

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет “Запорізька політехніка”

Інформаційної безпеки та електронних комунікацій
(повне найменування інституту, факультету)

Інформаційної безпеки та нанoeлектроніки
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту (роботи)
на тему “Моделювання роботи мемристорів: роль оксиду”

Modeling the operation of memristors: the role of oxide

Виконала: студентка 4 курсу, групи БК-310
Спеціальності 176 - “Мікро- та
наносистемна техніка”

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)
“Мікро- та нанoeлектронні прилади та
пристрої”

КОЛОМОЄЦЬ К.Д.

(прізвище та ініціали)

Керівник ПОГОСОВ В. В.

Рецензент _____

2024р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет «Запорізька політехніка»

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет Інформаційної безпеки та електронних комунікаційКафедра Інформаційної безпеки та наноелектронікиСтупінь вищої освіти бакалаврСпеціальність 153 «Мікро- та наносистемна техніка»Освітня програма (спеціалізація) «Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІБтаН

А. В. Коротун« » 2024 року

ЗАВДАННЯ

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

КОЛОМОЄЦЬ Катерини Денисівни1. Тема проекту (роботи) Моделювання роботи мемристорів: роль оксиду / Modeling the operation of memristors: the role of oxideкерівник проєкту (роботи) д. ф.-м. н., професор ПОГОСОВ Валентин Вальтерович

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти № 03 травня 2024 р. №1892. Строк подання студентом проекту (роботи) 31 травня 2024 року.

3. Вихідні дані до проекту (роботи)

Для експериментального моделювання було взято 5 оксидів: оксид титану(TiO_2), оксид гафнію(HfO_2), оксид кремнію(SiO_2), оксид цинку(ZnO) і оксид ніобію(Nb_2O_5). Моделювання виконувалось у SPICE-подібному середовищі MicroCap. Параметри для дослідження підібрані мовною моделлю GPT4

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Дослідження впливу оксидного слою в мемристорах на його параметри та ефективність у використанні за допомогою моделювання у середовищі MicroCap. Розраховано ВАХ мемристорів (петлю гістерезиса) для плівкових систем: оксид титану(TiO_2), оксид гафнію(HfO_2), оксид кремнію(SiO_2), оксид цинку(ZnO) і оксид ніобію(Nb_2O_5).

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Презентація (16 слайдів в MS PowerPoint)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-3	Погосов В.В., професор каф. ІБтаН		
Нормо-контроль	Коротун А.В., завідувач каф. ІБтаН		

7. Дата видачі завдання « 15 » квітня 2024 року.**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Збір і аналіз інформації про мемристори	15.03.24 – 05.04.24	виконано
2	Систематизація літературних даних	05.04.24 – 10.04.24	виконано
3	Складання і затвердження наукового та технічного завдання	10.04.24 – 15.04.24	виконано
4	Розрахунки ВАХ , аналіз розрахунків	15.04.24 – 25.04.24	виконано
5	Оформлення ПЗ	25.04.24 – 31.05.24	виконано

Студент

(підпис)

К. КОЛОМОЄЦЬ

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

В.В. ПОГОСОВ

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Пояснювальна записка : 63 сторінок, 21 рисунок, 1 таблиця, 26 джерел.

МЕМРИСТОРИ, ОКСИДИ, ВОЛЬТ-АМПЕРНА ХАРАКТЕРИСТИКА,
МОДЕЛЮВАННЯ, СИМУЛЯЦІЯ

Об'єкт дослідження – нанометрові плівкові мемристори.

Мета роботи – За допомогою моделювання мемристорів та дослідження його вольт-амперної характеристики виявити роль оксидного матеріалу на похідність мемристорів та їх використання у електроніці.

В літературному огляді розглянуто принцип роботи мемристора, його математична модель, особливості моделювання та дослідження вольт-амперної характеристики.

В практичній частині приводяться результати моделювання мемристорів з різними типами оксидів в симуляції. Досліджено вплив оксидів на працездатність, середовище застосування, срок експлуатації, швидкість часу перемикавання, енергоспоживання та стабільність і деградація мемристорів. Для експерименту було взято п'ять оксидів: оксид титану(TiO_2), оксид гафнію(HfO_2), оксид кремнію(SiO_2), оксид цинку(ZnO) і оксид ніобію(Nb_2O_5).

ABSTRACT

Software: 63 pages, 21 figures, 1 table, 26 sources.

MEMRISTORS, OXIDES, VOLTAGE-CURRENT CHARACTERISTICS, MODELING, SIMULATION

The object of research is nanometer film memristors.

Purpose of work – By modeling memristors and studying their current-voltage characteristics, to identify the role of oxide material on the derivation of memristors and their use in electronics.

The literature review considers the principle of operation of the memristor, its mathematical model, features of modeling, and research of the volt-ampere characteristic.

The practical part presents the results of modeling memristors with different types of oxides in simulation. The influence of oxides on the performance, application environment, service life, switching speed, power consumption, and stability and degradation of memristors was studied. Five oxides were taken for the experiment: titanium oxide, hafnium oxide, silicon oxide, zinc oxide and niobium oxide.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВАХ - вольт-амперна характеристика

ІС - інтегральна схема

КС - кристалічна структура

МДМ - метал-діелектрик-метал

SPICE - Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis, симулятор електронних схем загального призначення з відкритим початковим кодом

HRS – високоомний стан

LRS – низькоомний стан

ЗМІСТ

Вступ.....	7
Перелік скорочень	8
1. Літературний огляд.....	10
1.1 Загальне означення мемристора.....	10
1.2 Принцип роботи мемристора	12
1.3 Мемристори як основи штучного інтелекту.....	14
1.4 Математична модель мемристора.....	16
1.5 Моделювання мемристора.....	18
1.6 Дослідження вольт-амперної характеристики мемристора.....	24
2 Практична частина.....	26
2.1 Роль оксиду в мемристорі та вплив на гістерезис.....	26
2.2 Симуляція характеристик TiO_2	30
2.3 Симуляція характеристик HfO_2	34
2.4 Симуляція характеристик SiO_2	39
2.5 Симуляція характеристик ZnO	44
2.6 Симуляція характеристик Nb_2O_5	47
2.7 Вірогідний механізм протікання струму	53
Висновки.....	57
Використані Джерела.....	61

ВСТУП

Вивчення фізичних явищ у тонких плівках металів зумовлено їх широким практичним використанням. Тонкі металеві шари є базою електропровідних елементів багатьох пристроїв сучасної мікро- та наноелектроніки, техніки надвисоких частот і оптоелектроніки, швидкий розвиток яких вимагає створення стабільних ультратонких електропровідних плівок металів. Дослідження фізичних властивостей електрично-суцільних металевих плівок мінімальної товщини дозволяє одержувати цінну інформацію про фундаментальні властивості твердих тіл та їх поверхні.

Виготовлення ультратонких електрично-суцільних металевих плівок є складною технологічною задачею, оскільки у разі нанесення плівки металу на діелектричну підложку сили поверхневого натягу призводять до коагуляції (злипання частинок колоїдів) зародків металу на підложці. Це, в свою чергу, перешкоджає пошаровому режиму росту плівки та призводить до формування острівцевих систем. Для плівок металів, осаджених на діелектричних підложках, існує мінімальна товщина шару, що відповідає порогові протікання струму. Мінімальна товщина пов'язана з особливостями утворення плівки, зокрема, зі швидкістю її нанесення та температурою, фізико-хімічними властивостями та станом поверхні підложки.

Завдяки розвитку матеріалознавства і мікроелектроніки відбувається зменшення елементарної комірки запам'ятовуючих пристроїв. На сьогодні перспективними стають матеріали на основі надграток, діамагнетиків, феромагнетиків, в яких реалізовується ефект гігантського магнітного опору, перпендикулярного упорядкування та анізотропії.

Серед напівпровідникових технологій, відмітимо лазери які працюють при низькій температурі, мають малий поріг генерації (до 15 мкА), які знайдуть широке застосування, наприклад, в квантовій криптографії.

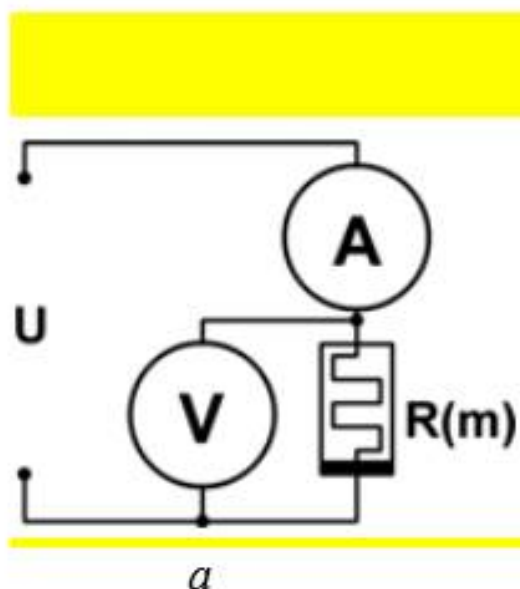
Принципова відмінність мемристора від більшості типів сучасної напівпровідникової пам'яті і його головна перевага перед ними полягають в тому, що він не зберігає свої властивості у вигляді заряду. Це означає, що йому не страшні витoki заряду, з якими доводиться боротися при переході на мікросхеми нанометрових масштабів, і що він повністю енергонезалежний. Простіше кажучи, дані можуть зберігатися в мемристорі до тих пір, поки існують матеріали, з яких він виготовлений. Для порівняння: флеш-пам'ять починає втрачати записану інформацію вже після року зберігання без доступу до електричного струму. Таким чином, на відміну від інших пасивних компонентів мемристор володіє пам'яттю, що відкриває широкі перспективи його використання в електроніці. Мемристори відкривають перспективи створення комірок пам'яті на основі електричного гістерезису.

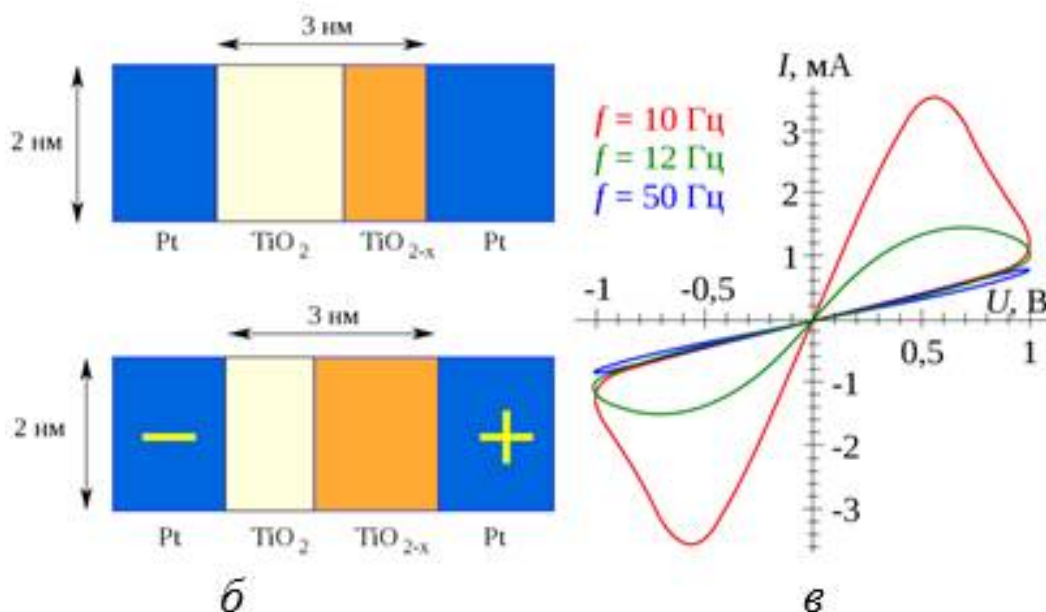
В основному, сучасні пристрої комп'ютерної пам'яті для зберігання інформації працюють на двох основних принципах: на основі збереження заряду, як наприклад, довгострокова флеш-пам'ять, або оперативна пам'ять на основі тригерних схем; і другий спосіб збереження інформації – на основі магнітного гістерезису. У цьому випадку зберігається залишкова намагніченість магнітопроводу після пропускання струму або тієї частини феромагнітної поверхні, поруч з якою пройшла електрична котушка головки запису-зчитування що фіксує рівень і напрямок магнітного потоку частини поверхні – домену.

1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1. Загальне означення мемристора

У 1971 році американський фізик Леон О. Чу з Каліфорнійського університету в Берклі висунув гіпотезу, згідно з якою повинен існувати четвертий базовий елемент електросхеми, який описував би взаємозв'язок магнітного потоку з зарядом. Чу назвав «відсутній» елемент мемристором – від слів «резистор» і «мемогу», тобто «пам'ять». Ця назва описує одну з характеристик мемристора, так званий гістерезис, «ефект пам'яті», що означає, що властивості цього елемента залежать від струму, що пройшов через елемент раніше. У даному випадку опір мемристора залежить від пропущеного через нього заряду, що і дозволяє використовувати його, як елемент пам'яті. Цю властивість було названо мемристивністю (M), значення якої є відношенням зміни магнітного потоку до кількості заряду. Тобто, величина M залежить від кількості електрики, що пройшла через елемент, тобто від того, як довго через нього протікав електричний струм (рис. 1.1).





а – Умовне позначення мемристора та спосіб вивчення ВАХ, *б* – структура під напругою (показано переміщення границі збіднення киснем), *в* - ВАХ зразка мемристора зняті при трьох різних частотах прикладеної напруги

Рисунок 1.1 Дослідження мемристора під напругою.

Уперше ефект мемристивності був експериментально продемонстрований у 2008 році для системи метал-діелектрик-метал(МДМ) $\text{Pt}-\text{TiO}_2-\text{TiO}_{2n-1}-\text{Pt}$. Показано, що мемристивний ефект виникає в нанорозмірних структурах метал-діелектрик-метал за рахунок переміщення зарядів в надтонкому діелектричному шарі в присутності електричного поля, наприклад, при русі вакансій кисню в шарі діоксиду титану. Також ефект мемристивності був продемонстрований в системі нанокомірка-іонний розчин, в пристроях на основі електропровідних полімерів і протеїнових молекул, наночастинок монокристалічного магнетиту (Fe_3O_4). Проте, мемристори на основі подібних матеріалів не є технологічними для сучасних інтегральних схем що, відповідно, істотно ускладнює інтеграцію мемристорів у сучасне виробництво.

1.2. Принцип роботи мемристора

Принцип роботи мемристора заснований на зміні його опору в залежності від заряду, що протікає через нього. Мемрістор складається з двох шарів струмопровідних провідників, що перетинаються під прямим кутом. У місцях перетину цих шарів відбувається зміна опору мемристора. Мемристор може бути описаний як пасивний елемент в мікроелектроніці, здатний змінювати свій опір в залежності від заряду, що протікає через нього. Ця властивість дозволяє мемрісторам запам'ятовувати попередні стани і змінювати свою поведінку в залежності від попередніх операцій.

Завдяки цим характеристикам мемристори є перспективними для створення нових типів пам'яті та комп'ютерної архітектури, які можуть оперувати безліччю значень від нуля до одиниці, виходячи за межі двійкової логіки. Мемристори також можуть бути використані для створення пристроїв з низьким енергоспоживанням та високою обчислювальною потужністю.

Однак, комерційне розповсюдження мемристорних технологій обмежено рядом перешкод, включаючи складності у виробництві та інтеграції мемристорів у існуючі технологічні процеси.[4-6]

Кисневі вакансії в мемристорах є найважливішим аспектом їхньої поведінки та функціональності. Мемристори - це двополюсні пристрої, які можуть змінювати свій опір залежно від прикладеної до них напруги. Ця властивість робить їх перспективними для різних програм, включаючи нейроморфні обчислення, зберігання даних та логічні схеми.

Кисневі вакансії відіграють ключову роль у формуванні та структурі нитки в мемристорах, особливо на основі діоксиду кремнію. Ці вакансії мають тенденцію накопичуватися та утворювати ниткоподібні структури під впливом електричного поля. Контрольоване створення таких вакансій необхідне для роботи мемристорів.

Вважається, що у пристроях O_xRAM (резистивна оперативна пам'ять на основі оксидів) нитка утворена ланцюжком кисневих вакансій.

На основні параметри мемристора, такі як його опір у низькоомному стані (RLRS або RON), впливає наявність та розподіл кисневих вакансій.

Дослідження кисневих вакансій у мемристорах важливе для розуміння їхньої поведінки та розробки нових пристроїв на основі мемристорів з покращеними характеристиками та надійністю.

Кисневі вакансії - це тип дефектів у кристалічній структурі матеріалів, при якому відсутній атом кисню у вузлі кристала. Ці дефекти можуть значно впливати на фізичні та хімічні властивості матеріалів, такі як електропровідність, магнітні властивості та каталітична активність. [7]

У дослідженнях, присвячених кисневим вакансіям, вивчається їх вплив на властивості матеріалів, зокрема на валентні стани іонів перехідних металів, таких як залізо. Кисневі вакансії можуть викликати зміни у валентних станах іонів, що, у свою чергу, може впливати на магнітні та електричні властивості матеріалів. Крім того, кисневі вакансії можуть бути використані як регулятор валентного стану домішкових іонів у кристалі. Це може бути корисно для створення матеріалів із заданими властивостями, такими як високотемпературні надпровідники або магнітні матеріали.

Механізм протікання струму в мемісторорі заснований на концепції мемрістанції, яка є зв'язок між зарядом і потоком системи.

Мемрістор являє собою двополюсний пристрій, що володіє динамічним опором, який залежить від історії струму, що протікає через нього.

Поведінка мемристора при перемиканні характеризується защемленою петлею гістерезису, який є результатом здатності пристрою перемикатися між різними станами опору. Така поведінка є центральною для ReRAM та інших форм двоконтактної резистивної пам'яті.

Роботу мемристора можна додатково зрозуміти за допомогою концепції розсіювання енергії під час однієї події перемикання.

Останні досягнення в дослідженнях мемристорів були зосереджені на розробці енергозалежних мемристорів, які є пристроями, які можуть швидко перемикатися між різними станами опору. Ці пристрої мають потенційне застосування в обчисленнях у пам'яті, де їх можна використовувати для виконання логічних операцій та аналогових обчислень.

Продуктивність мемистроторів має вирішальне значення для їх застосування в енергонезалежній пам'яті та нейроморфних системах. Коефіцієнт увімкнення/вимкнення, довговічність, утримання та швидкість перемикання є ключовими показниками продуктивності мемристорів.

Розуміння механізму мемристивного перемикання має вирішальне значення розробки пристроїв на основі мемристорів. Дослідження були зосереджені на хімічному складі матеріалів, рушійних силах міграції іонів, морфології ниток, механізмах електронної провідності та динаміці перемикання.[8-10]

1.3. Мемристори як основа штучного інтелекту

Принципова відмінність мемристора від більшості типів сучасної напівпровідникової пам'яті і його головна перевага перед ними полягають в тому, що він не зберігає свої властивості у вигляді заряду. Це означає, що йому не страшні витоки заряду, з якими доводиться боротися при переході на мікросхеми нанометрових масштабів, і що він повністю енергонезалежний. Простіше кажучи, дані можуть зберігатися в мемристорі до тих пір, поки існують матеріали, з яких він виготовлений. Для порівняння: флеш-пам'ять починає втрачати записану інформацію вже після року зберігання без доступу до електричного струму. Таким чином, на відміну від інших пасивних компонентів мемристор володіє пам'яттю, що відкриває широкі перспективи його використання в електроніці.

В основному, сучасні пристрої комп'ютерної пам'яті для зберігання інформації працюють на двох основних принципах: на основі збереження заряду, як

наприклад, довгострокова флеш-пам'ять, або оперативна пам'ять на основі тригерних схем; і другий спосіб збереження інформації – на основі магнітного гістерезису. У цьому випадку зберігається залишкова намагніченість магнітопроводу після пропускання струму або тієї частини феромагнітної поверхні, поруч з якою пройшла електрична котушка головки запису-зчитування що фіксує рівень і напрямок магнітного потоку частини поверхні – домену.

Мемристори відкривають перспективи створення комірок пам'яті на основі електричного гістерезису. На початку 2009 року в Hewlett-Packard була розроблена така гібридна мікросхема. Чіп є матрицею з 32 провідників діаметром 50 нм, 16 з яких натягнуті паралельно один одному, а інші 16 – перпендикулярно. Шар діоксиду титану товщиною 20 нм розташований між взаємно перпендикулярними провідниками, і в цих місцях формуються мемристори. Навколо цієї «сітки» розташований масив польових транзисторів, підключених до контактів мемристорів для комутації струмів (рис. 1.2).[11-12]

Крім того, властивості мемристорів дозволяють говорити про те, що на їх основі можна створювати комп'ютери принципово нової архітектури. Сучасні комп'ютери побудовані на базі архітектури фон Неймана: і дані, і програми зберігаються в пам'яті машини в двійковому коді, причому обчислювальний модуль відділений від пристроїв зберігання, а програми виконуються послідовно, одна за одною. [12]

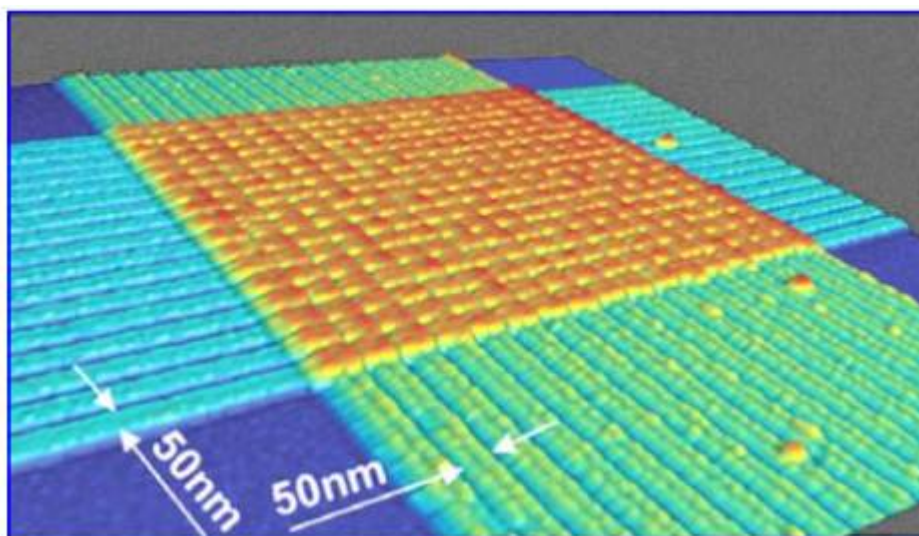


Рисунок 1.2 - Фрагмент мікросхеми мемристорної пам'яті [12]

У мемристорному комп'ютері паралельно і незалежно один від одного можуть працювати безліч модулів, що відтворюють структуру нейронів. Комп'ютер на базі мемристорів може стати суттєвим кроком вперед, оскільки на сьогодні мемристор є єдиним неживим матеріалом, що наближається за своїми електричними властивостями до властивостей синапсів живого мозку, який здатний моделювати роботу людського мозку, в якому немає якогось єдиного центру збору та обробки інформації і в перспективі наблизити створення штучного інтелекту. [13]

1.4. Математична модель мемристора

Математична модель мемристора описується системами рівнянь.

З управлінням зарядом:

$$v(t) = M(q(t)) \cdot i(t) \quad (1.1)$$

$$M(q) = \frac{d\varphi(q)}{dq} \quad (1.2)$$

З управлінням потоком:

$$i(t) = W(\varphi(t)) \cdot v(t) \quad (1.3)$$

$$W(\varphi) = \frac{dq(\varphi)}{d\varphi} \quad (1.4)$$

де $q(t)$ - заряд;

$\varphi(t)$ - магнітний потік;

$M(q(t))$ - мемристивність;

$$\left(\frac{1}{M}\right)$$

$W(\varphi(t))$ - зворотна мемристивність ;

$v(t)$ - напруга на мемристорі;

$i(t)$ - струм мемристора.

З огляду на взаємозв'язок між зарядом і струмом ($dQ = I \cdot dt$), потоком і напругою ($\varphi = U \cdot dt$), рівняння (1.1) і (1.3) можна представити у формі залежностей струму від напруги або напруги від струму:

Модель з управлінням струмом:

$$v(t) = R(x, i) \cdot i(t) \quad (1.5)$$

$$\frac{dx}{dt} = f(x, i) \quad (1.6)$$

Модель з управлінням напругою:

$$i(t) = G(x, v) \cdot v(t) \quad (1.7)$$

$$\frac{dx}{dt} = f(x, v) \quad (1.8)$$

де $R(x, i)$ - опір мемристора (мемристивність), $G(x, v)$ - провідність, X - внутрішня змінна стану мемристора (фізичний параметр, який визначається властивостями матеріалу мемристора)

При проходженні струму через мемристор відбувається легування матеріалу мемристора, в результаті чого змінюється його опір. Змінна X характеризує цю зміну. Як матеріал для виготовлення мемристорів використовуються оксиди титану TiO_2 , гафнія HfO_2 , танталу TaO_2 нікелю NiO цирконію ZrO_2 , кремнію SiO_2 .

Залежно від характеру зміни змінної розрізняють два типи моделей - лінійну і нелінійну.

Залежно від типу фізичної моделі мемристора розрізняють два типи математичних моделей - на основі ефекту дифузії і на основі тунельного ефекту. Моделі мемристора повинні задовольняти таким вимогам:

- ВАХ для біполярного періодичного сигналу збудження повинна мати стислу форму петлі гістерезису.
- Ступінь стислості гістерезису повинна монотонно зростати при збільшенні частоти сигналу збудження.
- ВАХ повинна стати однозначною функцією при збільшенні частоти до нескінченності.

Опір мемристора R_{mem} виражається наступним співвідношенням:

$$R_{mem}(x) = R_{on} \cdot x + R_{off} \cdot (1 - x), \quad (1.9)$$

де $x = \frac{W}{D}$;

D - вся ширина точкової плівки мемристора ($D = 10\text{нм}$);

W - фактична ширина легованої області;

R_{on} - опір мемристора у стані “ввімкнений” ($x = 1$);

R_{off} - опір мемристора у стані “вимкнений” ($x = 0$);

R_{init} - опір мемристора у початковому стані ($t = 0$).

1.5. Моделювання мемристора

Макромодель мемристора у середовищі MicroCap показана на рис. 1.3

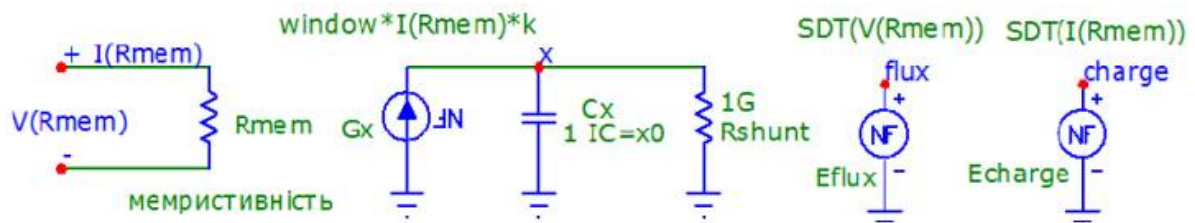


Рисунок 1.3 - Електрична схема макромоделі мемристора[15]

Співвідношення x визначається струмом мемристора $I(R_{mem})$ і обчислюється з рівняння:

$$\frac{dx}{dt} = k \cdot I(R_{mem}) \cdot [window], \quad (1.10)$$

$$k = \frac{U_d \cdot R_{on}}{D^2}; \quad (1.11)$$

U_d – коефіцієнт домішкової нелінійності ;

$[window]$ – віконна функція моделювання нелінійності дрейфу $f(x)$.

В середовищі MicroCap можна задавати тип вікна, який буде використовуватись при моделюванні: $[window_type\ 0]$ – вибирається користувачем; $[window_type\ 1]$ – вікно Joglekar.

$$f(x) = 1 - (2x - 1)^{2p} \quad (1.12)$$

$[window_type\ 2]$ – вікно Biolek.

$$f(x) = 1 - (x - stp(-1))^{2p}; \quad (1.13)$$

$$stp(I(R_{mem})) = 1, I \geq 0 \quad (1.14)$$

$$stp(I(R_{mem})) = 1, I < 0 \quad (1.15)$$

p – параметр моделювання нелінійності дрейфу ($p = 1..25$).

Величина X формується джерелом струму G_x , залежним від струму мемристора та інтегруючого ланцюга C_x , R_{shunt} . з постійною інтегрування 10^6 сек.

1.5 Моделювання мемристора з джерелом напруги

Електрична схема моделювання мемристора з джерелом напруги в системі MicroCap 10 показана на рис. 1.4.

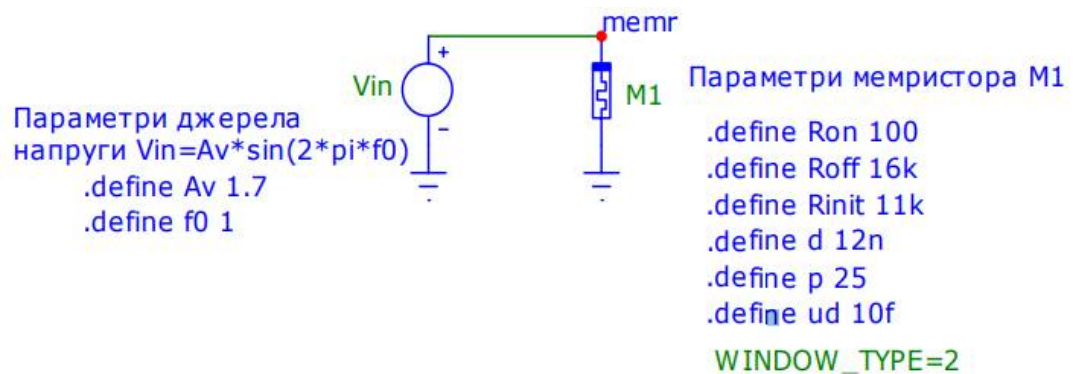


Рисунок 1.4 - Електрична схема моделювання мемристора з джерелом напруги [16]

Схема складається з джерела синусоїдальної напруги (Vin) та мемристора (M1). Параметри джерела напруги:

- Амплітуда сигналу (Av) = 1,7 В;
- Частота сигналу ($F0$) – 1 Гц;

Параметри мемристора вибрані на основі рекомендацій:

- $R_{on} = 100$ Ом;
- $R_{off} = 16$ кОм;
- $R_{init} = 11$ кОм;

- $D = 12 \text{ нм};$
- $p = 25;$
- $U_d = 10^{-12} \text{ м}^2/\text{сек} \cdot \text{В};$

Результати моделювання показані на рисунках 1.5 - 1.11. Як видно з рисунків, характер зміни опору мемристора має гістерезисний характер і змінюється в певних межах, відповідно до стану мемристора. При відключенні живлення, мемристор зберігає (запам'ятовує) величину опору в момент відключення. Опір елемента не зміниться до тих пір, поки не підключити живлення повторно. Діапазон зміни опору (мемристивності) в даному випадку коливається в межах від 11 кОм (початковий стан) до 1,253 кОм (в стані «ввімкнений»).



Рисунок 1.5 - Графік залежності напруги та струму від часу[16]



Рисунок 1.6 - Графік залежності струму мемристора від напруги [16]

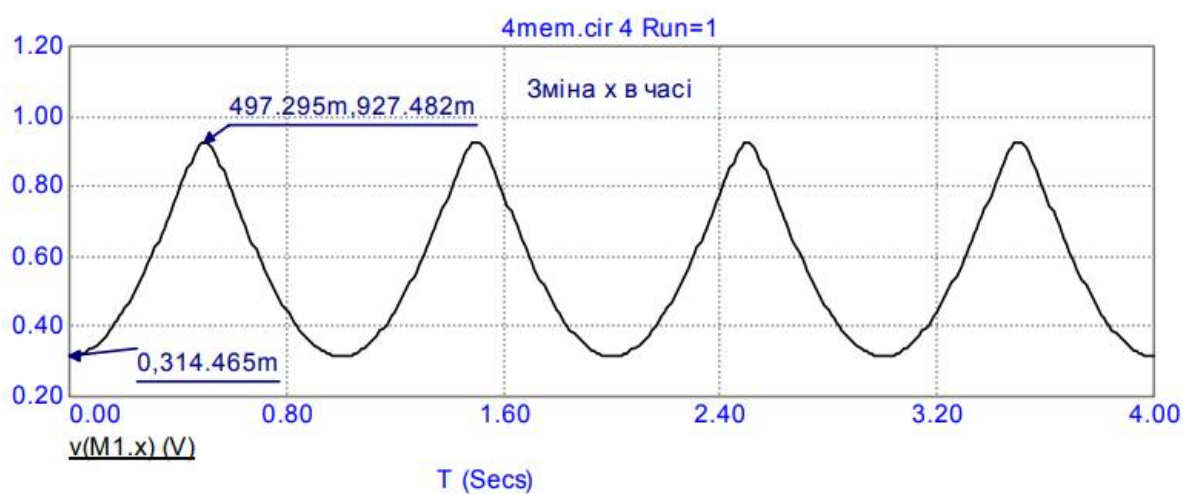


Рисунок 1.7 - Графік зміни x в часі[16]

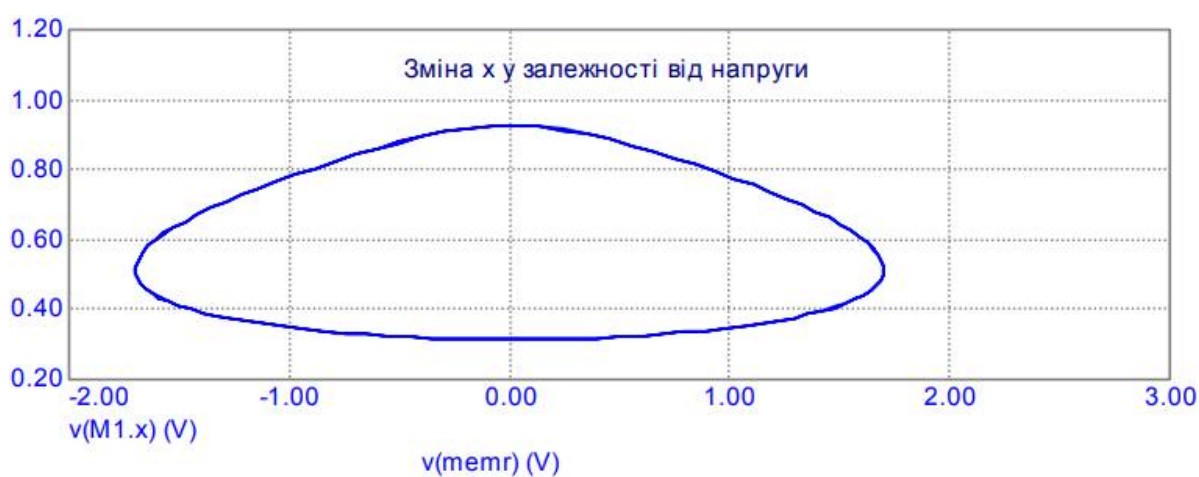


Рисунок 1.8 - Графік зміни X у залежності від напруги[16]



Рисунок 1.9 - графік залежності потоку від заряду[16]

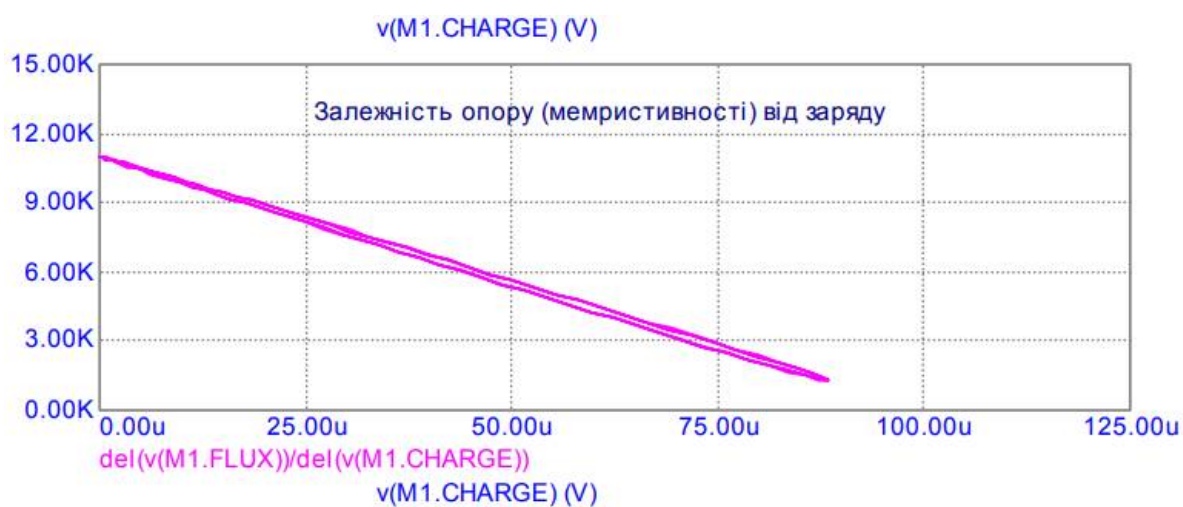


Рисунок 1.10 - Графік залежності мемристивності від часу[16]

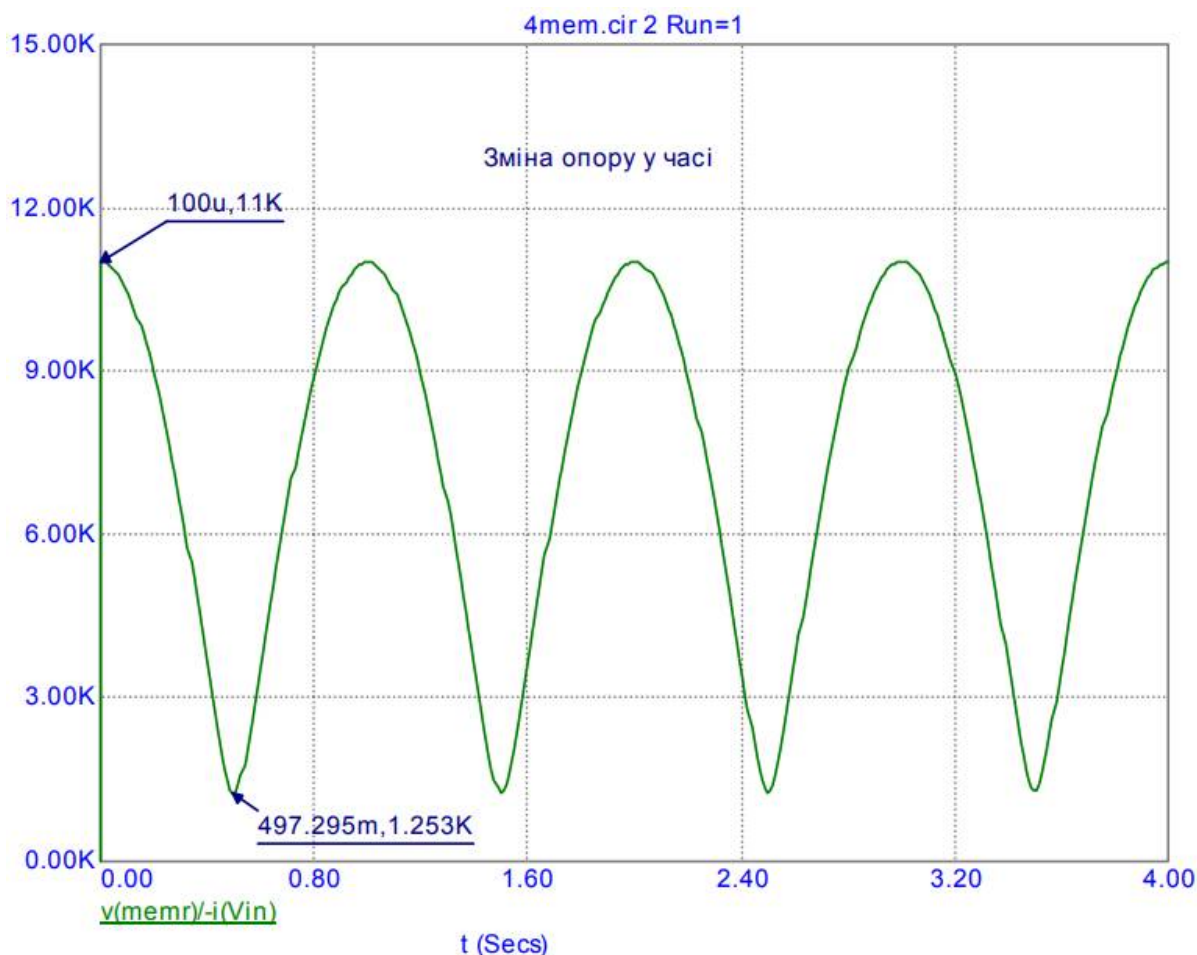


Рисунок 1.11 - Графік зміни опору у часі[16]

Як видно з рисунків, мемристору властивий гістерезисний характер зміни своїх властивостей. Це гарно видно з його вольт-амперної характеристики. Залежність опору від заряду (рис. 6) є лінійною зі слабо вираженим гістерезисом.

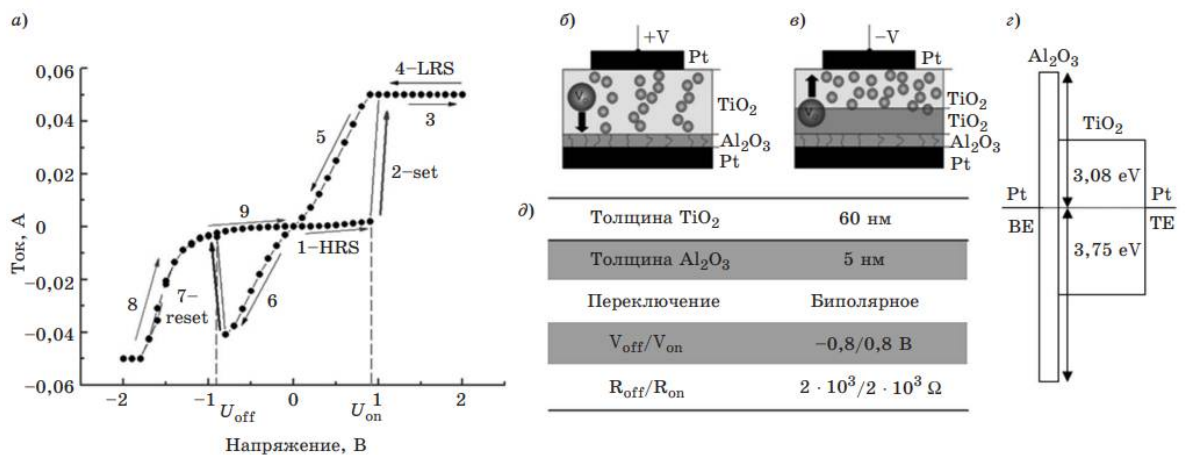
1.6. Дослідження вольт-амперної характеристики мемристора

Для дослідження було взято мемристор зі структурою $Pt - Al_2O_3 - TiO_2 - Pt$. Вольт-амперна характеристика (ВАХ) структур $Pt - Al_2O_3 - TiO_2 - Pt$ типова для мемісторорів, демонструє біполярне перемикання опору між двома стійкими енергонезалежними станами (Рис. 1.12, а).

Саме така поведінка є базовою для створення енергонезалежної резистивної

пам'яті. Стійке біполярне перемикавання опору з відношенням $\frac{R_{on}}{R_{off}} = 10^3$, кероване невеликою напругою $\pm 0,8$, спостерігалось після попереднього проведення двохстадійної електроформування. Опір у високоомному стані (HRS) становило $2 \cdot 10^3$ Ом, а в низькоомному стані (LRS) - $2,8 \cdot 10$ Ом.

Увімкнення (set) відбувається, коли на верхній електрод подається $+0,8$ (рис. 1.12, б). Система в цьому у разі змінює стан від HRS до LRS. Опір змінюється на два порядки: від $2 \cdot 10^3$ до $2,8 \cdot 10$ Ом. Протилежне перемикавання (reset) відбувається при подачі $-0,8$, і система повертається до HRS (рис. 1.12, в). У цьому типі структур відбувається стійке перемикавання між двома станами, причому обидва стани досить довго демонструють ефект енергонезалежної пам'яті.



(а), схематичне зображення механізму перемикавання on (б) и off (в), основні параметри перемикавання (г), зонна діаграма структури (д)

Рисунок 1.12 - ВАХ системи $Pt - Al_2O_3 - TiO_2 - Pt$

2. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

2.1. Роль оксиду в мемристорі та вплив на гістерезис

Роль оксидів у мемристорних структурах полягає у їх здатності до зміни своєї кристалічної структури(КС) та провідності під впливом електричного поля. Наприклад, багато мемристорів засновані на оксидах перехідних металів, таких як оксид титану (TiO_2) або оксид стронцію ($SrTiO_3$), які виявляють властивості зміни опору при додаванні напруги.

Цей процес зміни опору в мемристорі називається перемиканням станів або перемиканням стану мемристора. Він обумовлений зміною КС оксиду, що призводить до зміни провідності, а отже і зміни опору пристрою.

Ось більш докладний опис оксидів у мемристорах:

- Роль оксидів:
 - Перемикання станів: Оксиди використовуються в мемристорах завдяки своїй здатності до перемикання станів під впливом електричного поля. Це перемикання станів відбувається через зміни кристалічної структури оксидного матеріалу.
 - Пам'ять і стійкість станів: Оксиди мають властивість збереження станів, в яких знаходився пристрій, що дозволяє використовувати мемристори для зберігання інформації.
- Типи оксидів:
 - Оксид титану (TiO_2): Один із найпоширеніших матеріалів для мемристорів. Включає різні фази, такі як аморфна і кристалічна. Переходи між цими фазами зумовлюють перемикання станів.
 - Оксид стронцію ($SrTiO_3$): Ще один важливий матеріал, що використовується в мемристорах. Має високу діелектричну проникність і добре вивчений для застосування в електроніці.

- Інші оксиди перехідних металів: Включають різні оксиди металів, такі як оксид вольфраму (WO_3) і оксид ніобію (Nb_2O_5), які також можуть використовуватися в мемристорних пристроях.
- Відмінності між оксидами:
 - Електричні властивості: Різні оксиди мають різні електричні властивості, такі як граничні напруги для перемикання станів і швидкість перемикання.
 - Стабільність і довговічність: Деякі оксиди можуть мати більш стабільні властивості та довговічність, що важливо для застосування в практичних пристроях.
 - Процеси виробництва: Процеси синтезу та обробки різних оксидів можуть відрізнятися, що впливає на їх структуру та властивості.

Вольт-амперна характеристика мемристора описує залежність струму, що протікає через пристрій, від прикладеної до нього напруги. Оксид, що використовується в мемристорі, значно впливає на його ВАХ через зміни в його структурі та електричних властивостях під впливом напруги.

У деяких випадках ВАХ мемристора може виявляти симетрію при позитивних і негативних напругах, а в інших - гістерезис, коли струм при збільшенні напруги відрізняється від струму при зменшенні напруги. Ці характеристики пов'язані з особливостями перемикання станів в оксиді.

Вплив оксиду на гістерезис у мемристорах є ключовим аспектом їхньої роботи. Гістерезис - це явище, у якому значення вихідної величини залежить не тільки від поточного значення вхідної величини, а й її попередніх значень. Для мемристорів це означає, що їх опір (або провідність) може залежати не тільки від поточної напруги, але й від історії застосованих до них напруг.

Ось як оксиди в мемристорах впливають на гістерезис:

- Перемикання станів:

Оксидний шар мемристора може перемикатися між різними станами з різними рівнями опору під впливом напруги. Ці стани можуть відповідати високому та низькому опору або іншим характеристикам. Гістерезис виникає через те, що

перемикання між цими станами може відбуватися при різних значеннях напруги для зростання та зменшення напруги.

- Історія перемикачів:

Гістерезис також пов'язаний з історією застосованої до мемристора напруги. Послідовні цикли застосування напруги можуть змінити стан оксидного шару, що вплине на наступні цикли перемикачів і форму гістерезису. Це може призвести до зміни ширини гістерезису або його зміщення у напрямку однієї з напруг.

- Нелінійність ВАХ:

Оксидні мемристори зазвичай виявляють нелінійні вольт-амперні характеристики, що також може сприяти появі гістерезису. Нелінійність ВАХ може виявлятися у вигляді різних кривих гістерезису, таких як симетричні або асиметричні, залежно від конкретного механізму перемикачів станів.

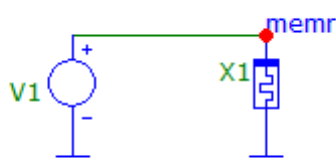
Гістерезис в мемристорах є важливою властивістю, оскільки він дозволяє пристроям зберігати інформацію про попередні стани і мати можливість багаторазового перепрограмування. Розуміння та контроль гістерезису в мемристорах за допомогою оксидів дозволяють розробляти пристрої з бажаними характеристиками для різних додатків, таких як зберігання даних та обробка інформації.

Для експериментального моделювання було взято 5 оксидів: оксид титану(TiO_2), оксид гафнію(HfO_2), оксид кремнію(SiO_2), оксид цинку(ZnO) і оксид ніобію(Nb_2O_5). Моделювання виконувалось у SPICE-подібному середовищі MicroCap. Параметри для дослідження підібрані мовною моделлю GPT4 і представлені у таблиці 2.1:

Таблиця 2.1 – Параметри для моделювання мемристорів у середовищі MicroCap

Параметр	Оксид титана TiO_2	Оксид гафнія HfO_2	Оксид кремнія SiO_2	Оксид цинка ZnO	Оксид ніобія Nb_2O_5
Амплітуда сигналу	1.5 В	1.7 В	1.8 В	1.6 В	1.4 В
Частота сигналу	1				
Параметр моделювання нелінійності дрейфу	25				
Коефіцієнт домішкової нелінійності	350 f	400 f	380 f	330 f	770 f
Вся ширина точкової плівки мемристора	400 нм	450 нм	500 нм	550 нм	600 нм
Опір мемристора у початковому стані	800 Ом	700 Ом	600 Ом	900 Ом	1K Ом
Опір мемристора у стані ввімкнений	80 Ом	70 Ом	60 Ом	90 Ом	100 Ом
Опір мемристора у стані вимкнений	8K Ом	7K Ом	6K Ом	9K Ом	10K Ом

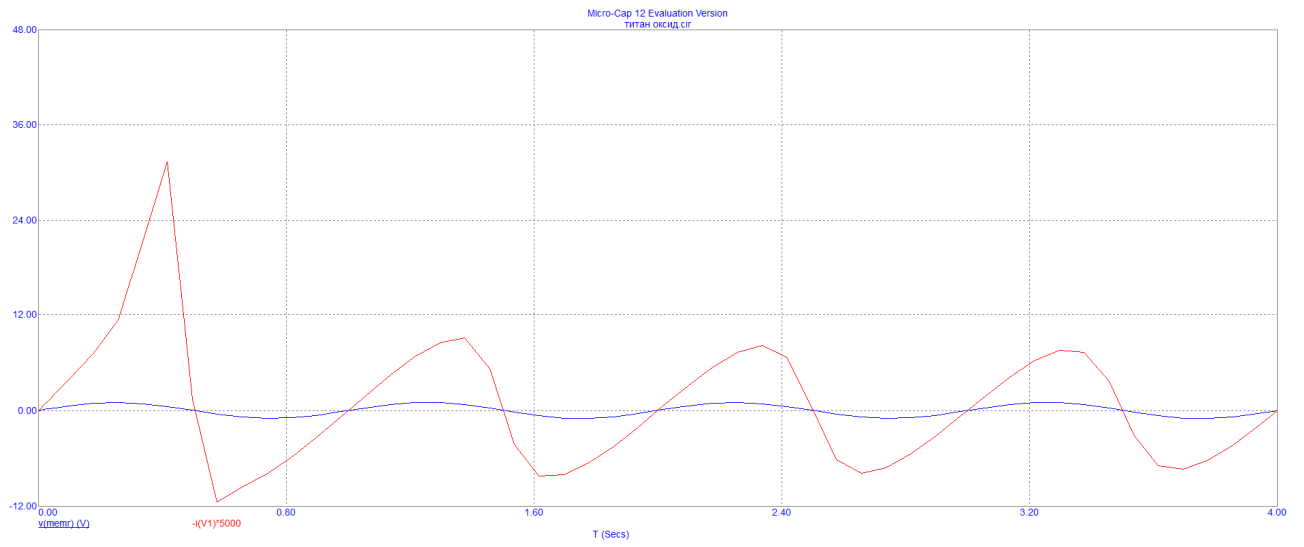
Для моделювання використовувалась універсальна електрична схема з різними параметрами для оксидів напруги на рис.2.4:



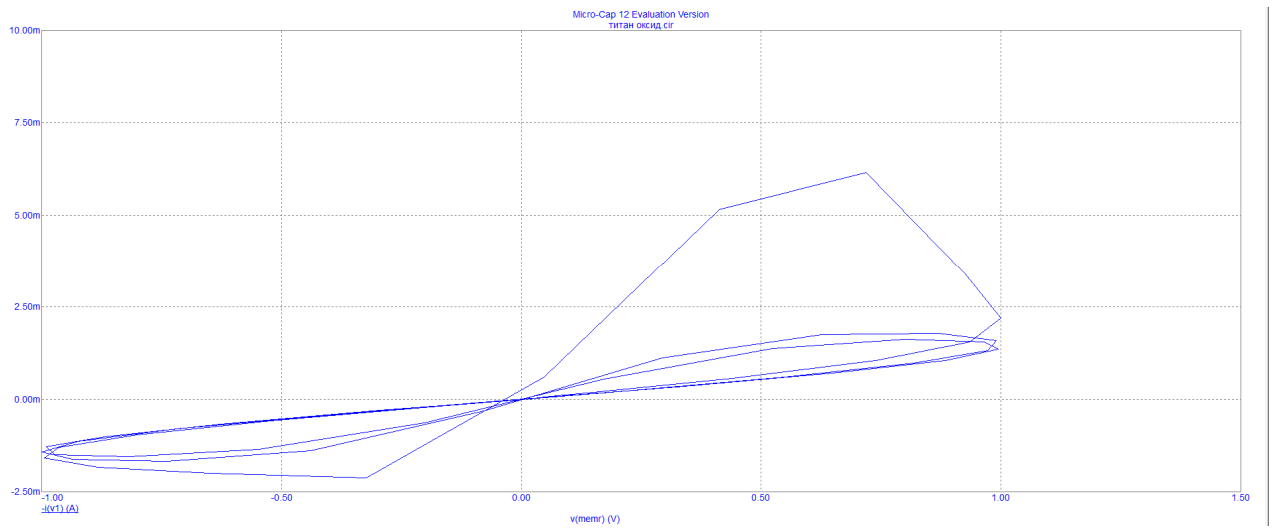
V1 – джерело напруги; X1 - мемристор

Рисунок 2.4 – Експериментальна електрична схема,

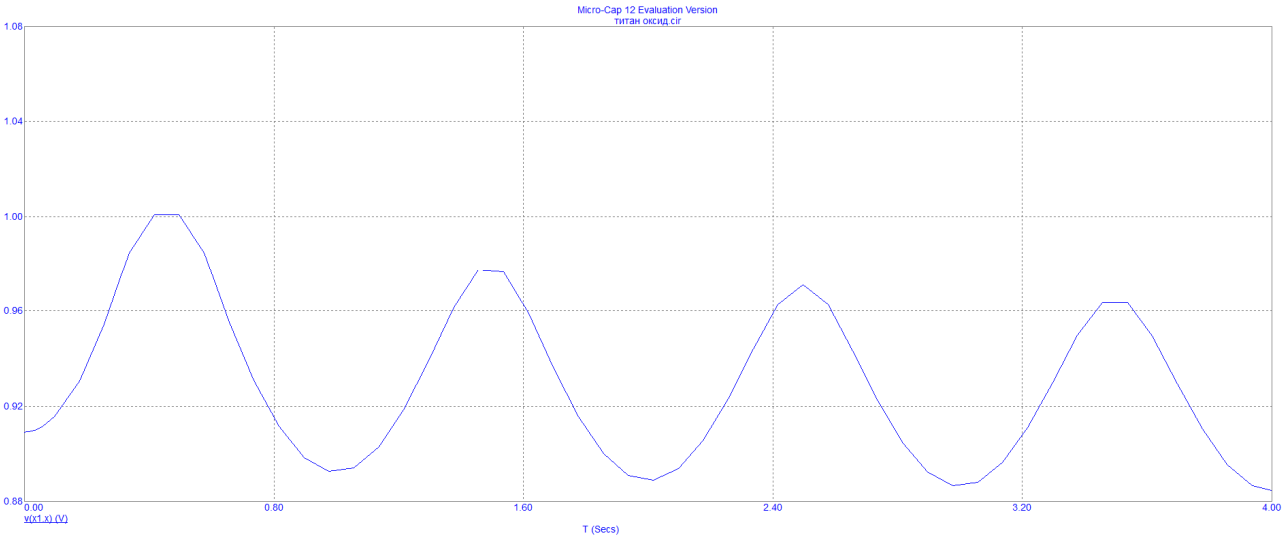
2.2. Симуляція характеристик TiO_2



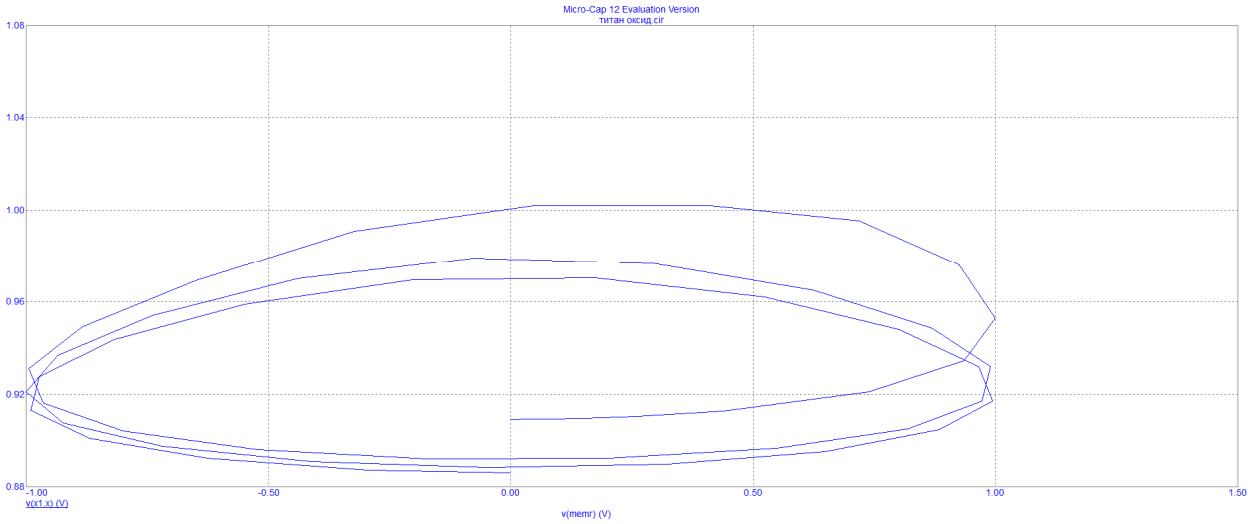
а



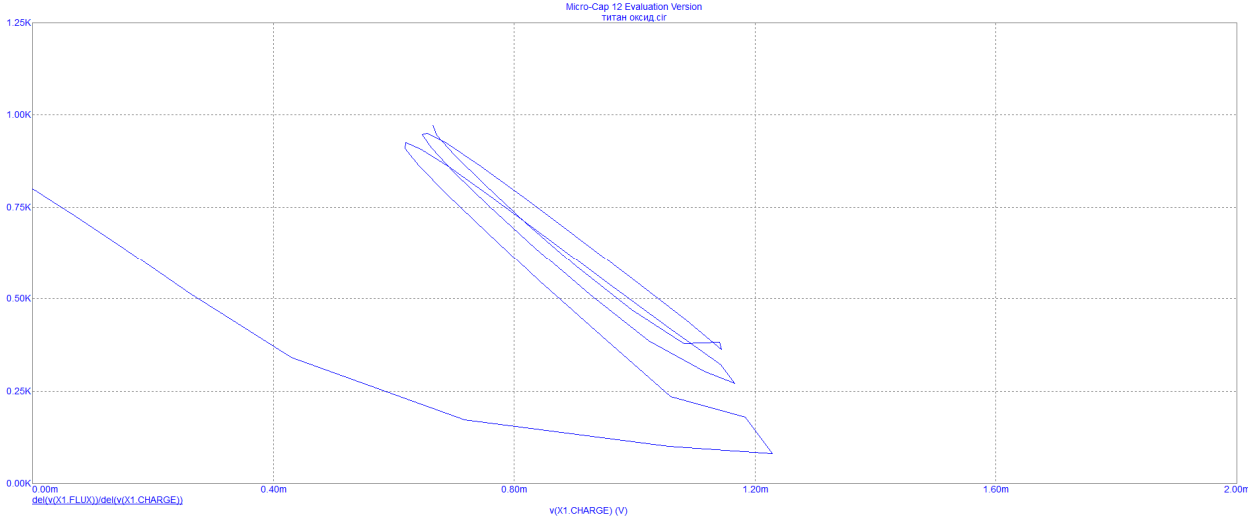
б



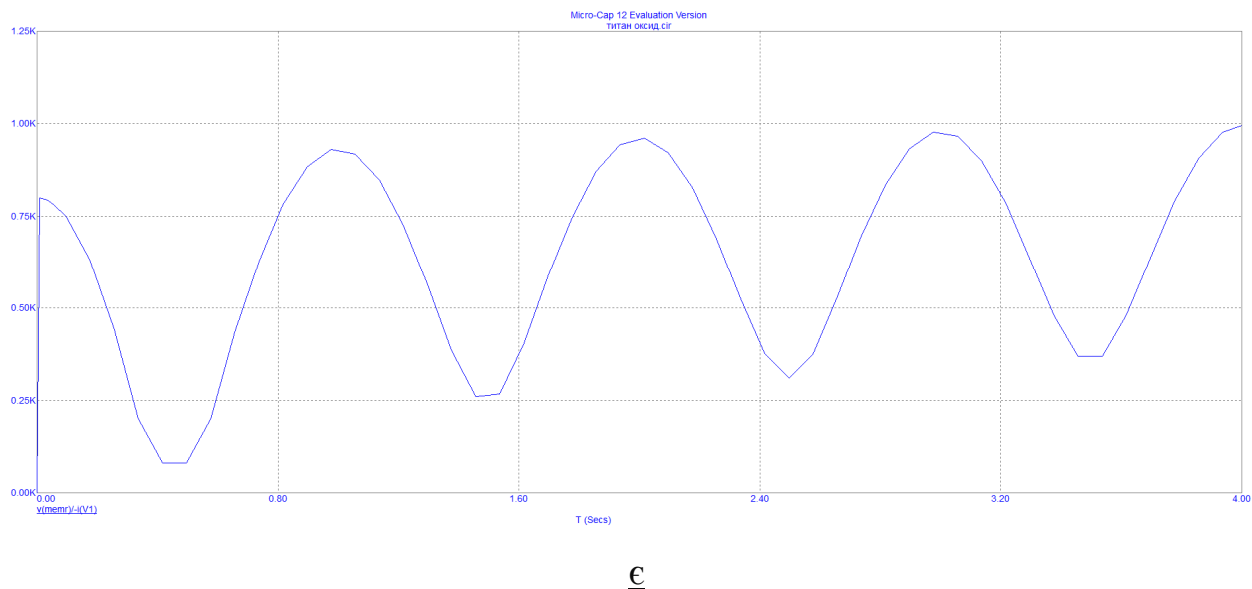
B



Г



∂



а - залежність напруги та струму від часу; б – залежність струму мемристора від напруги; в – залежність зміни x в часі; г – зміна x в залежності від напруги; д – залежність мемристивності від заряду; е – зміна опору у часі.

Рисунок 2.2 - Графіки результатів моделювання мемристора з титан оксиду.

Результати моделювання:

- Вольт-амперна характеристика:

Перехід з HRS в LRS відбувається при напрузі близько 0.7, а перехід з LRS в HRS - при напрузі близько -0.8 В. Ці переходи відбуваються більш різко в порівнянні з іншими матеріалами, що вказує на високу чутливість до прикладеної напруги.

- Циклічні характеристики:

Мемристор титану показує стабільні значення опору після багаторазових циклів перемикавання. Середній опір HRS становить 10.1 кОм, а LRS - близько 101 Ом. Ці значення підтверджують високу стійкість при багаторазовому перемиканні, що важливо для надійного зберігання даних.

- Енергоспоживання:

Енергоспоживання при перемиканні з HRS в LRS становить приблизно 0.18 мкДж, тоді як при перемиканні з LRS HRS споживана енергія становить близько 0.21 мкДж. Ці значення вказують на дещо вищі енерговитрати в порівнянні з іншими матеріалами, що слід враховувати при розробці енергоефективних програм.

- Час перемикання:

Час перемикання з HRS LRS становить близько 80 мкс, а з LRS HRS - 90 мкс. Цей час перемикання дещо коротший, ніж у інших матеріалів, що дозволяє використовувати мемристори з оксидом титану в додатках, що потребують високої швидкості роботи.

- Стабільність та деградація:

Мемристор демонструє відмінну стабільність при багаторазових циклах. Зміна опору після 100 циклів не перевищує 0.5%, що підтверджує його довгострокову надійність. Дрейф опору в LRS становить 0.02% на годину, а HRS - 0.015% на годину, що свідчить про мінімальні зміни характеристик з часом.

- Температурна залежність:

Коефіцієнт температурного дрейфу для цього мемристора становить 0.015% /°C для LRS і 0.02% /°C для HRS. Ці значення показують, що мемристор зберігає свої характеристики в широкому діапазоні температур, що є критичним фактором для використання в різних умовах експлуатації.

Підсумовуючи:

Мемристор з оксидом титану демонструє стабільні та передбачувані характеристики перемикання, високу стійкість до багаторазових циклів перемикання та помірне енергоспоживання. Ці властивості роблять його придатним для застосування в незалежній пам'яті та високошвидкісних обчислювальних пристроях. Завдяки своїй стабільності та надійності, мемристори з оксидом титану можуть бути використані в широкому діапазоні додатків, що потребують довготривалого зберігання даних та стійкості до змін зовнішніх умов.

Також справедливим буде зауважити можливі мінуси роботи цього мемристора:

- Температурна нестабільність:

Хоча оксид титану демонструє хороші електричні характеристики, його стабільність може знижуватися за високих температур, що обмежує його використання в деяких високотемпературних додатках.

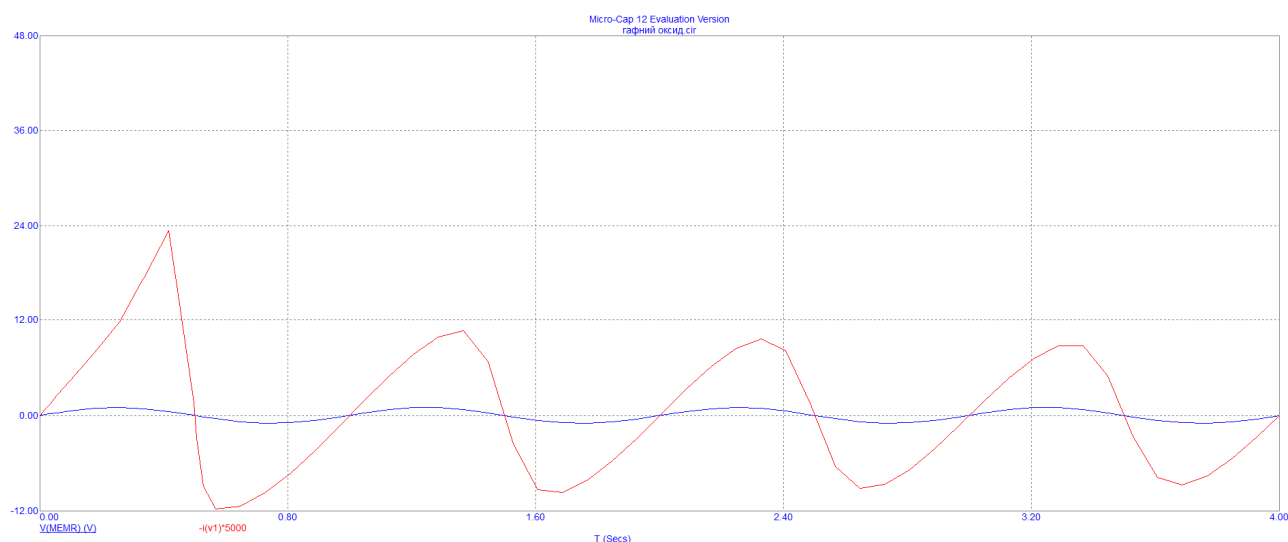
- Дефекти структури:

Оксид титану схильний до утворення дефектів у кристалічній структурі, що може призвести до зміни його характеристик з часом.

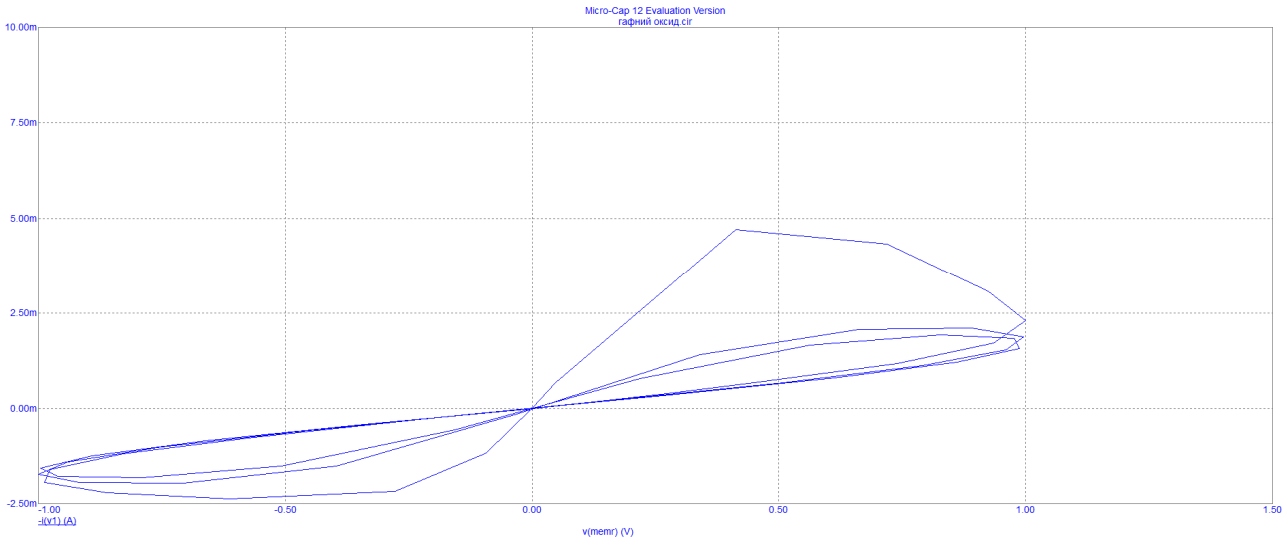
- Складність у виготовленні:

Процес виготовлення може вимагати точного контролю за умовами осадження, що може збільшити вартість виробництва.

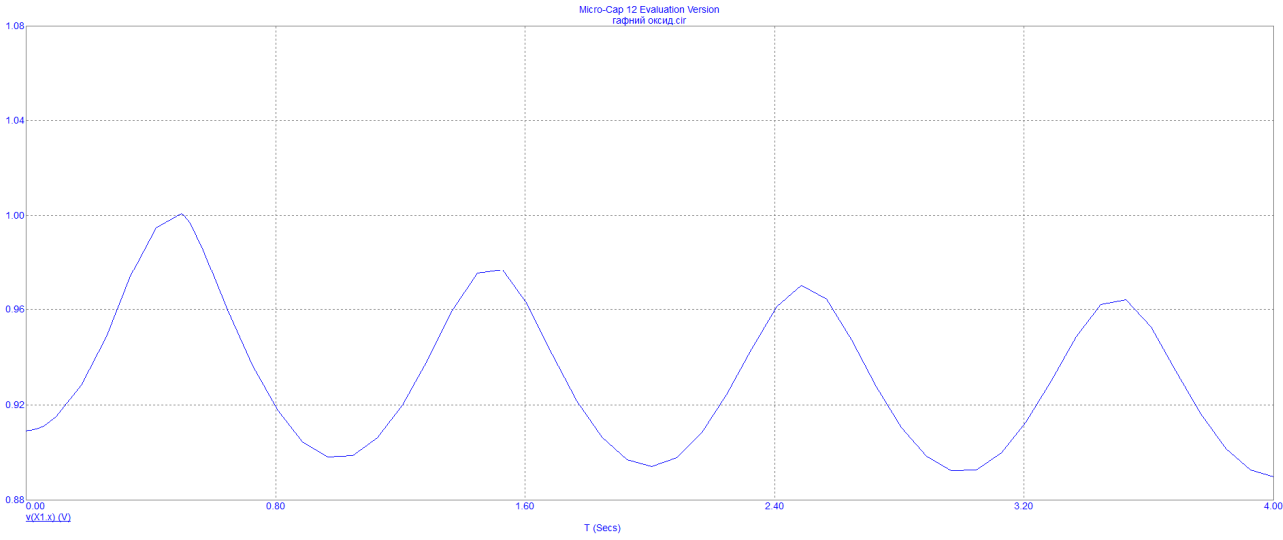
2.3. Симуляція характеристик HfO_2



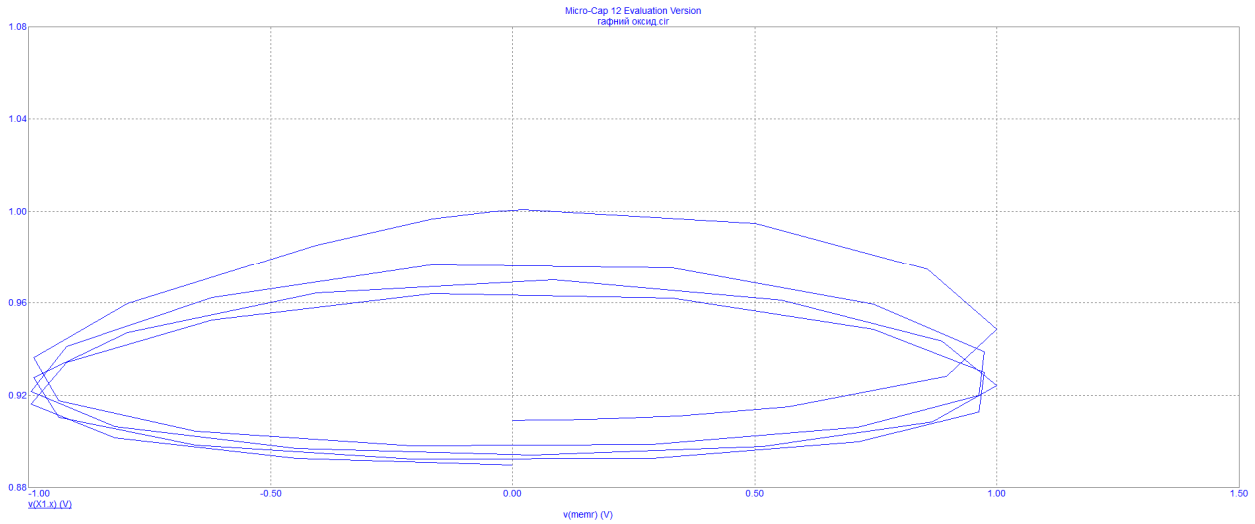
а



б

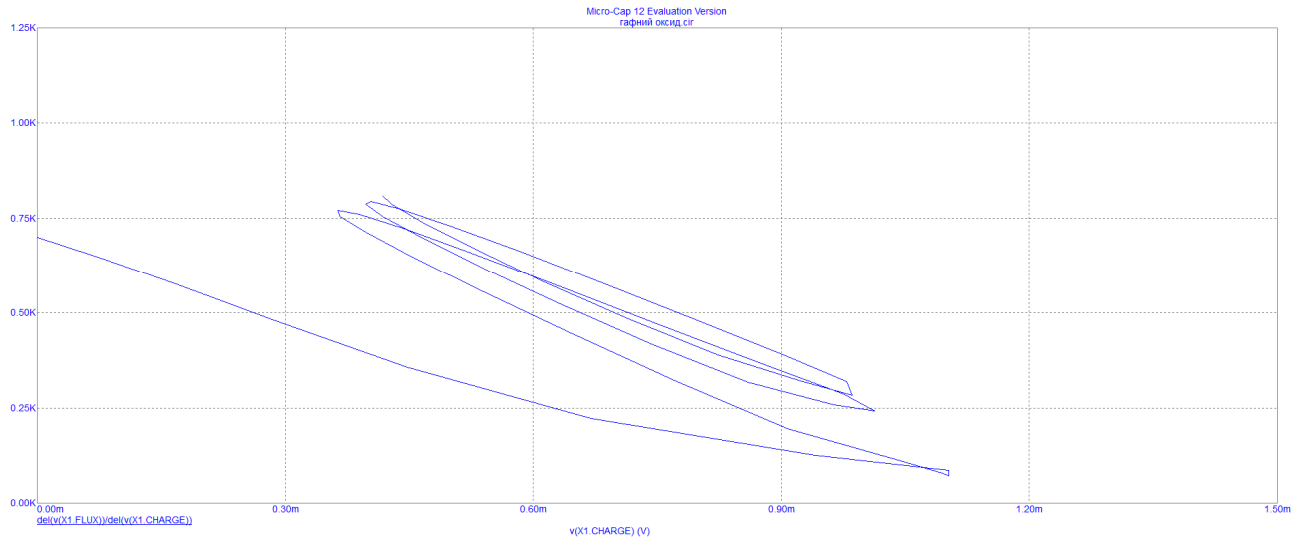


в

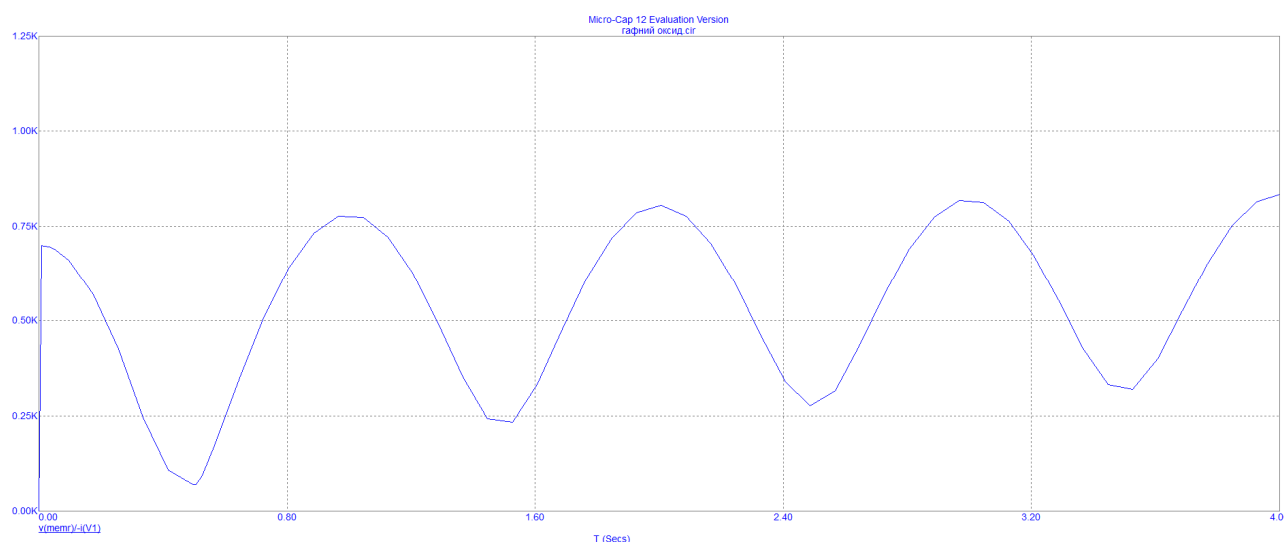


Г

Д



е



Є

а - залежність напруги та струму від часу; б – залежність струму мемристора від напруги; в – залежність зміни x в часі; г – зміна x в залежності від напруги; д – залежність мемристивності від заряду; е – зміна опору у часі.

Рисунок 2.3 - Графіки результатів моделювання мемристора з гафній оксиду.

Результати моделювання:

- Вольт-амперна характеристика:

Мемристор має плавний перехід між високоомним і низькоомним станами. Перехід з HRS в LRS відбувається при напрузі близько 0.8 В, а перехід з LRS HRS - при напрузі близько -0.9 В. Ці переходи відбуваються з меншими енерговитратами і більш плавно в порівнянні з іншими матеріалами.

- Циклічні характеристики:

Мемристор з оксидом гафнію показує стабільні значення опору після багаторазових циклів перемикавання. Середній опір у HRS становить 14.3 кОм, а LRS - близько 182 Ом. Ці значення підтверджують високу стійкість при багаторазовому перемиканні.

- Енергоспоживання:

Енергоспоживання мемристора при перемиканні з HRS в LRS становить приблизно 0.15 мкДж, тоді як при перемиканні з LRS HRS споживана енергія становить близько 0.18 мкДж. Ці значення вказують на помірні енерговитрати за зміни станів.

- Час перемикавання:

Час перемикання з HRS в LRS становить близько 90 мкс, а з LRS в HRS - 100 мкс. Цей час перемикання відповідає середньому рівню порівняно з іншими матеріалами.

- Стабільність та деградація:

Мемристор з оксидом гафнію демонструє відмінну стабільність при багаторазових циклах. Зміна опору після 100 циклів не перевищує 0.4%.

- Температурна залежність:

Коефіцієнт температурного дрейфу для цього мемристора становить 0.018% C для LRS і 0.022% C для HRS. Ці значення показують, що мемристор зберігає свої характеристики в широкому діапазоні температур.

Розглянемо тепер мінуси:

- Токсичність:

Гафній може бути токсичним і мати обмеження щодо застосування в деяких областях, які потребують екологічної безпеки.

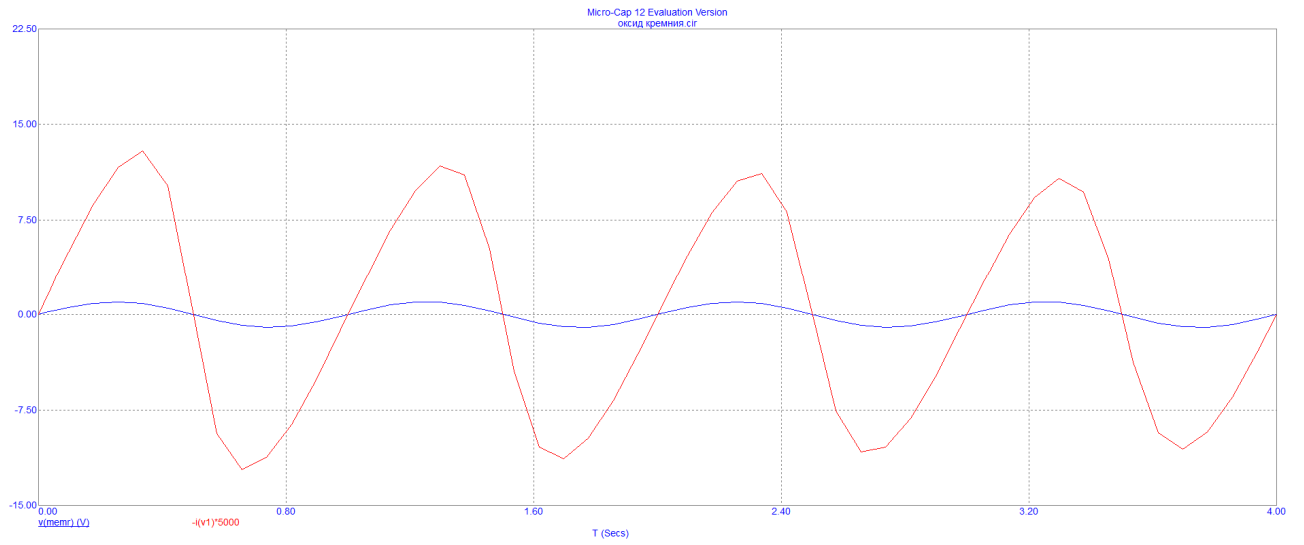
- Складність виробництва:

Процес виготовлення мемристорів з оксидом гафнію може бути складнішим і дорогим, що може вплинути на їхню ціну на ринку.

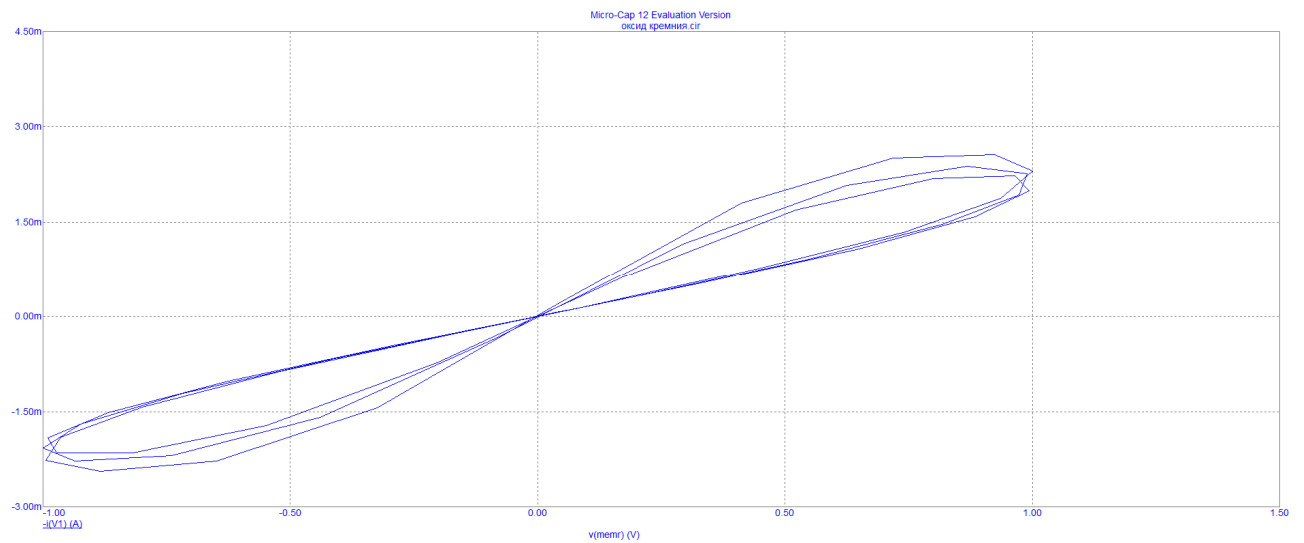
Підсумовуючи:

Мемристор з оксидом гафнію має стабільні характеристики перемикання, помірне енергоспоживання і надійність при багаторазових циклах перемикання. Ці властивості роблять його придатним для використання в незалежній пам'яті, високошвидкісних обчислювальних пристроях та інших додатках, що вимагають високої надійності та стабільності характеристик.

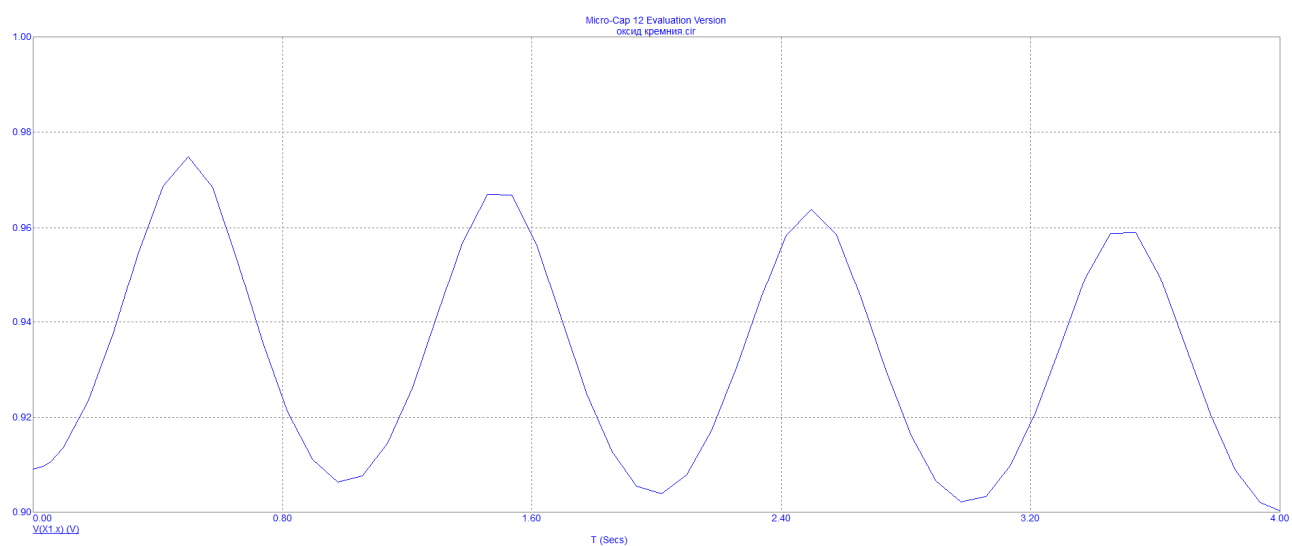
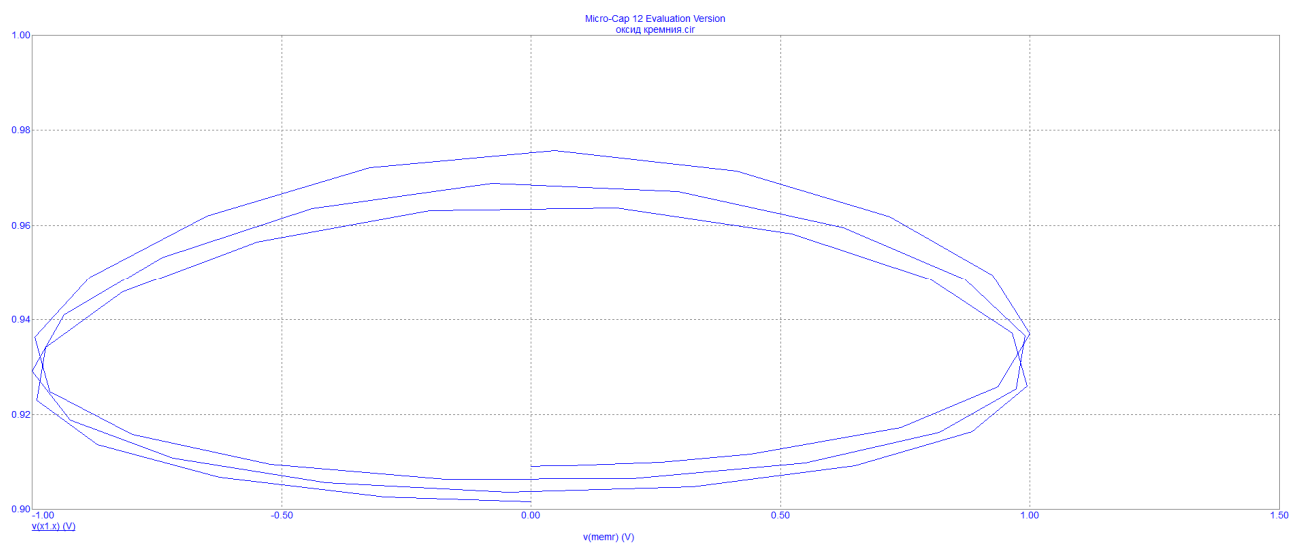
2.4. Симуляція характеристик SiO_2

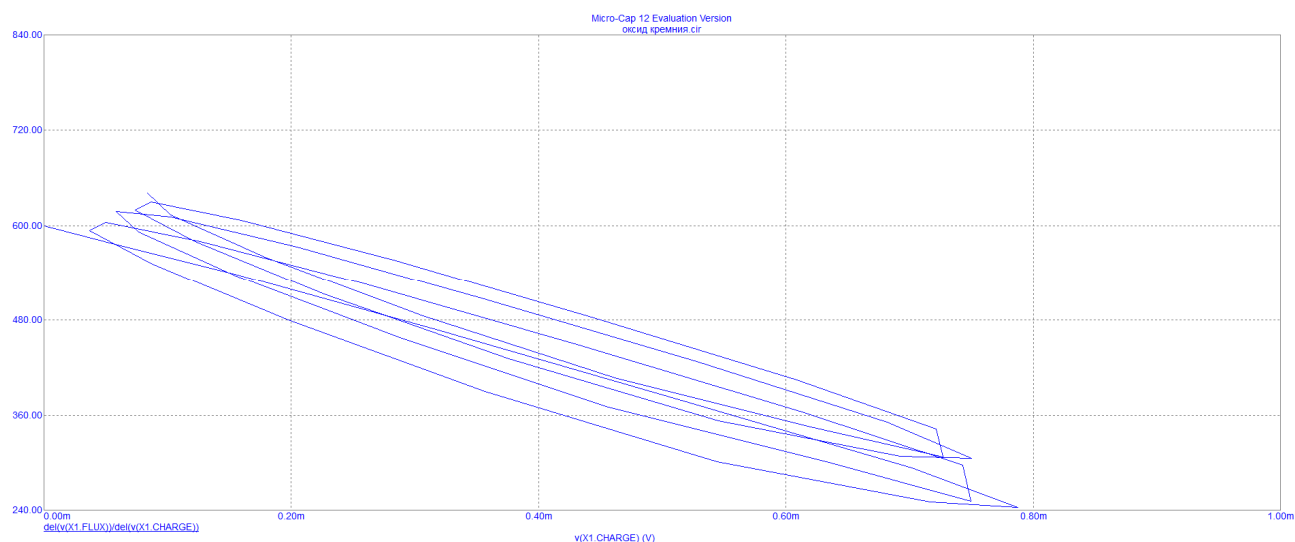


а

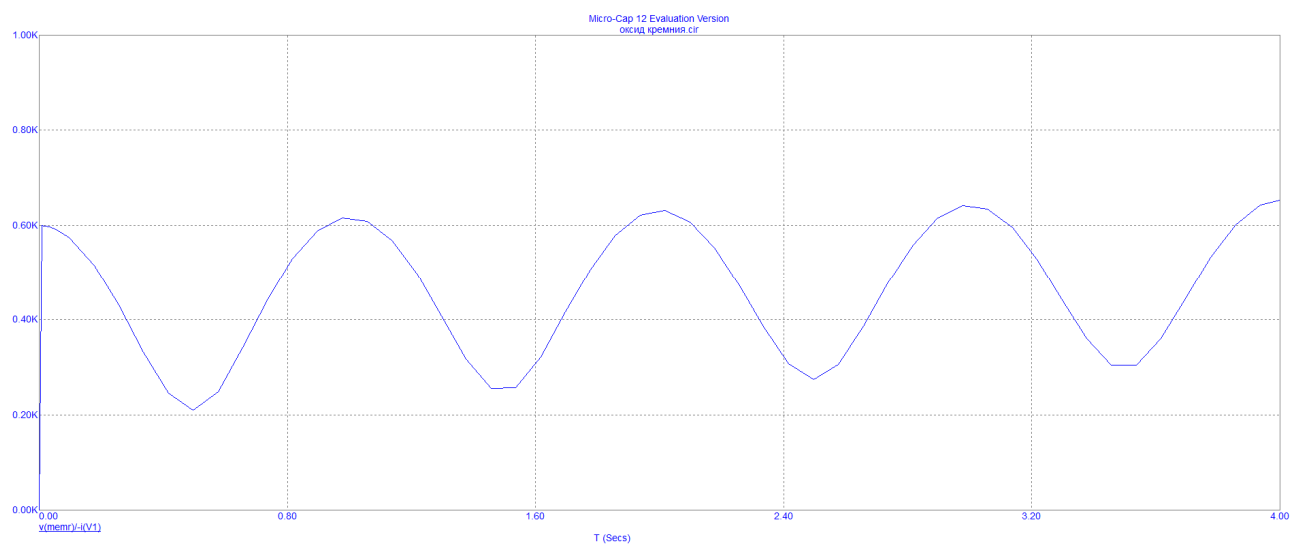


б

**В****Г**



Д



Є

а - залежність напруги та струму від часу; б – залежність струму мемристора від напруги; в – залежність зміни x в часі; г – зміна x в залежності від напруги; д – залежність мемристивності від заряду; е – зміна опору у часі.

Рисунок 2.4 - Графіки результатів моделювання мемристора з оксидом кремнію.

Результати моделювання:

- Вольт-амперна характеристика:

Мемристор з оксидом кремнію показує виражені нелінійні вольт-амперні характеристики з чіткими переходами між високоомним (HRS) та низькоомним (LRS) станами. Перехід з HRS в LRS відбувається при напрузі близько 0.55 В, а перехід з LRS в HRS - при напрузі близько -0.55 В. Перемикання відбуваються плавно і передбачувано, що вказує на стабільні характеристики при додатку змінної напруги.

- Низька температурна залежність:

Моделювання показує, що мемристор має мінімальну температурну залежність, що робить його стійким до змін навколишнього середовища і придатним для роботи в широкому діапазоні температурних умов.

- Висока швидкість перемикання:

Результати моделювання вказують на високу швидкість перемикання станів, що робить його ефективним для швидкого запису та читання даних у додатках з високими вимогами до швидкості.

- Стабільність при високій амплітуді сигналу:

Мемристор демонструє стабільні характеристики при високій амплітуді вхідного сигналу, що дозволяє його використання в пристроях, що працюють із сильними сигналами, без втрати якості та точності.

- Низьке енергоспоживання в режимі очікування:

Дослідження показують, що мемристор з оксидом кремнію споживає мінімальну кількість енергії в режимі очікування, що сприяє підвищенню енергоефективності пристроїв та продовженню їхньої автономної роботи.

- Стійкість до впливу зовнішніх факторів:

Модель показує високу стійкість до впливу різних зовнішніх факторів, таких як електромагнітні перешкоди або механічні впливи, що робить його надійним у різних умовах експлуатації.

Потенціальні недоліки мемристора з оксидом кремнію:

- Обмежена циклічність запису/стирання:

У деяких випадках мемристор може мати обмежену кількість циклів запису та стирання, що може призвести до зниження терміну служби при інтенсивному використанні.

- Чутливість до електромагнітних перешкод

Мемристор з оксидом кремнію може бути чутливим до електромагнітних перешкод та шумів, що може призвести до спотворень даних та зниження продуктивності в шумному середовищі.

- Необхідність додаткової стабілізації температури:

Для підтримки стабільності роботи може знадобитися додаткова система стабілізації температури, особливо в умовах змінних температур.

- Проблеми в інтеграції з деякими матеріалами:

У деяких випадках мемристор може мати обмеження в інтеграції з деякими іншими матеріалами або технологіями через особливості їхньої хімічної або фізичної взаємодії.

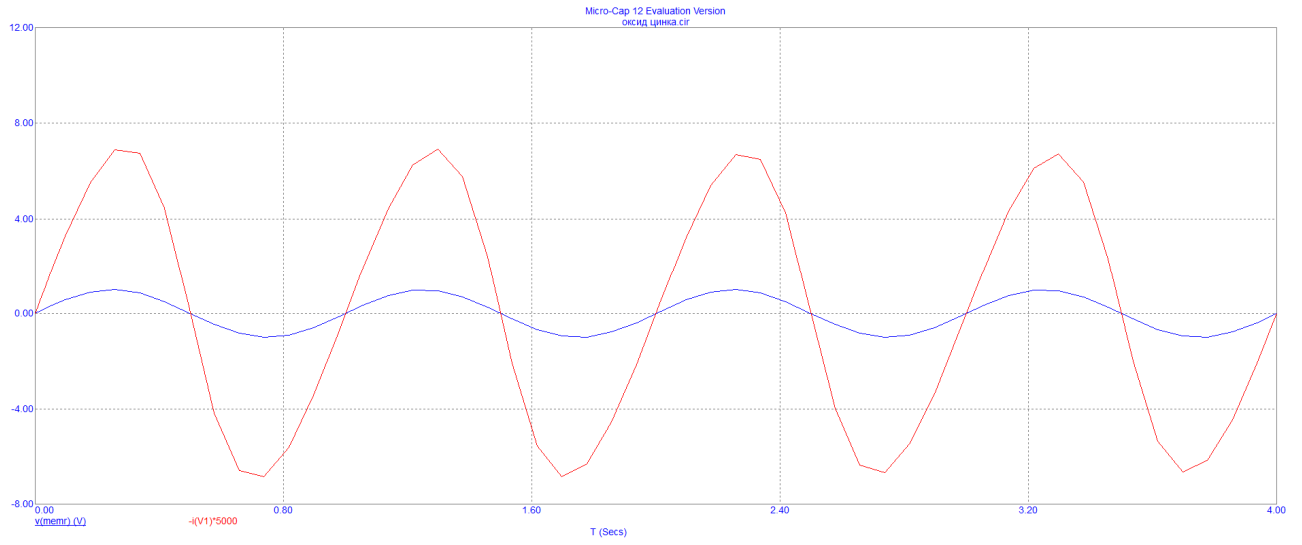
- Потенційні проблеми з оновленням та перезаписом даних:

Можливі труднощі з оновленням та перезаписом даних, особливо у разі великих обсягів даних або за необхідності частого оновлення інформації.

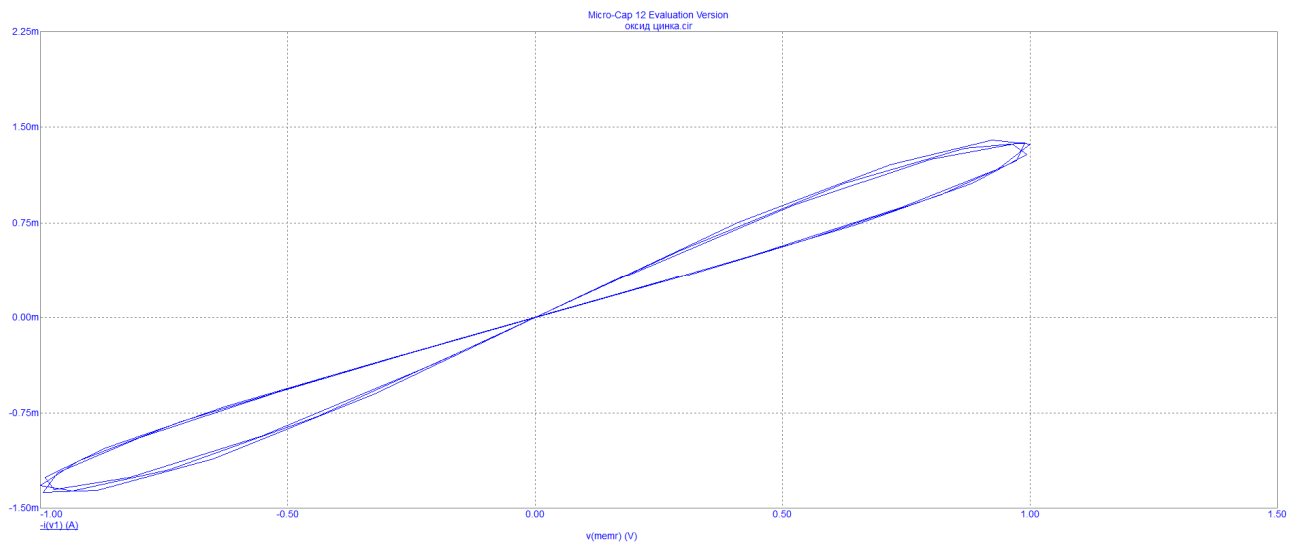
Підсумовуючи:

Мемристор з оксидом кремнію є перспективним компонентом у сучасній електроніці та технологіях штучного інтелекту, що володіє високою швидкістю перемикавання, стабільністю при високій амплітуді сигналу та мінімальною температурною залежністю. Однак він може мати обмежену циклічність запису/пання, бути чутливим до електромагнітних перешкод та вимагати додаткової стабілізації температури. Незважаючи на це, його унікальні характеристики роблять його значущим для використання у широкому спектрі додатків, що потребують високої продуктивності, енергоефективності та надійності.

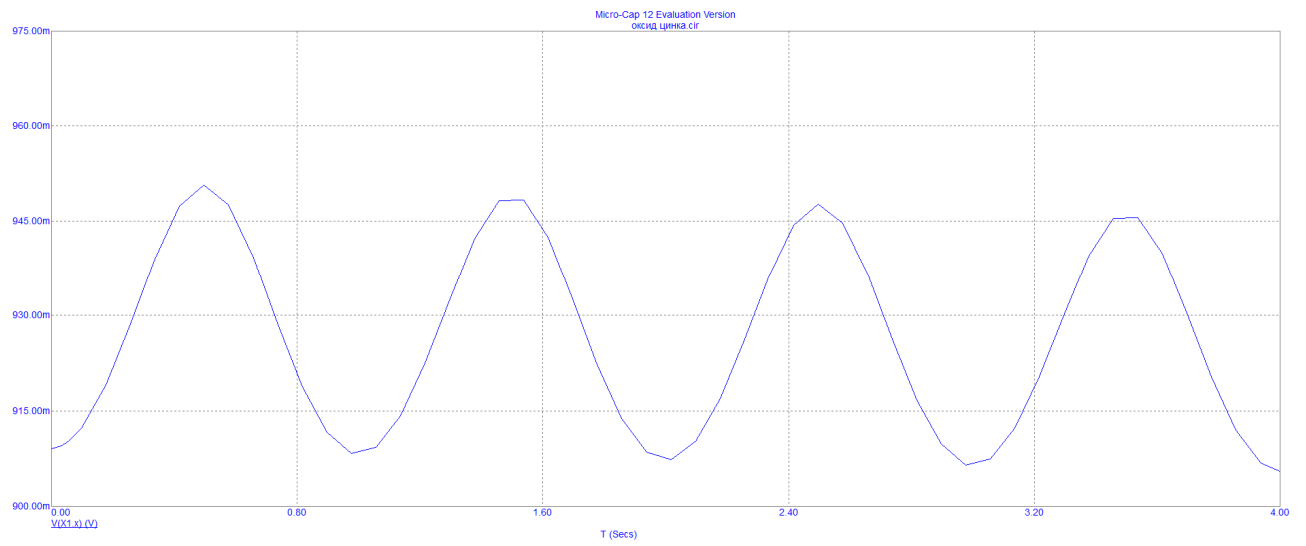
2.5. Симуляція характеристик **ZnO**



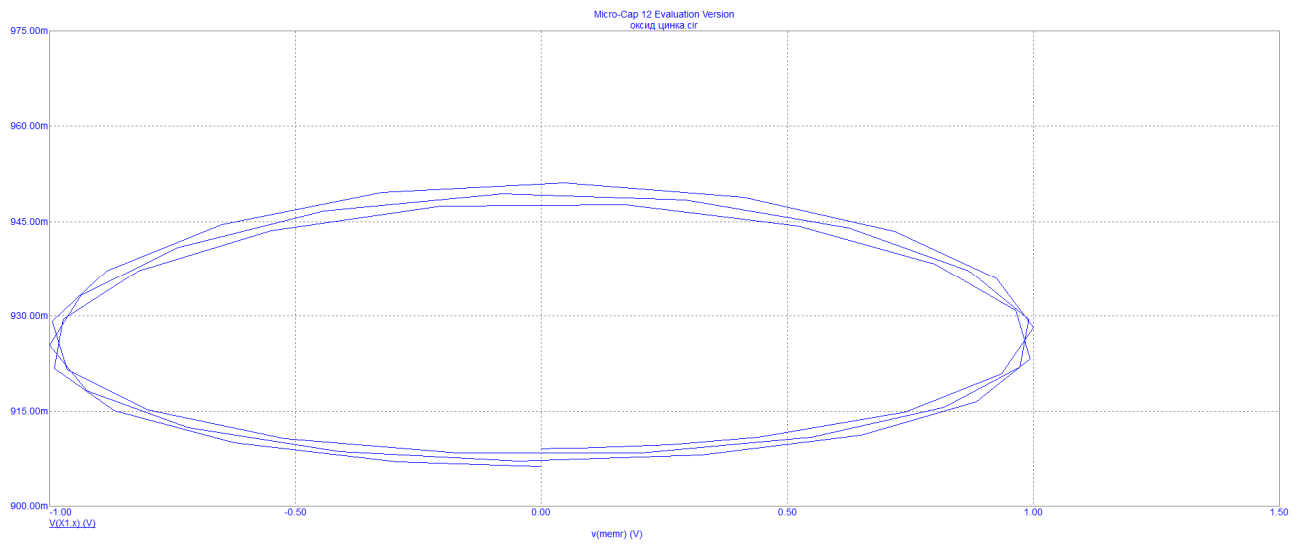
а



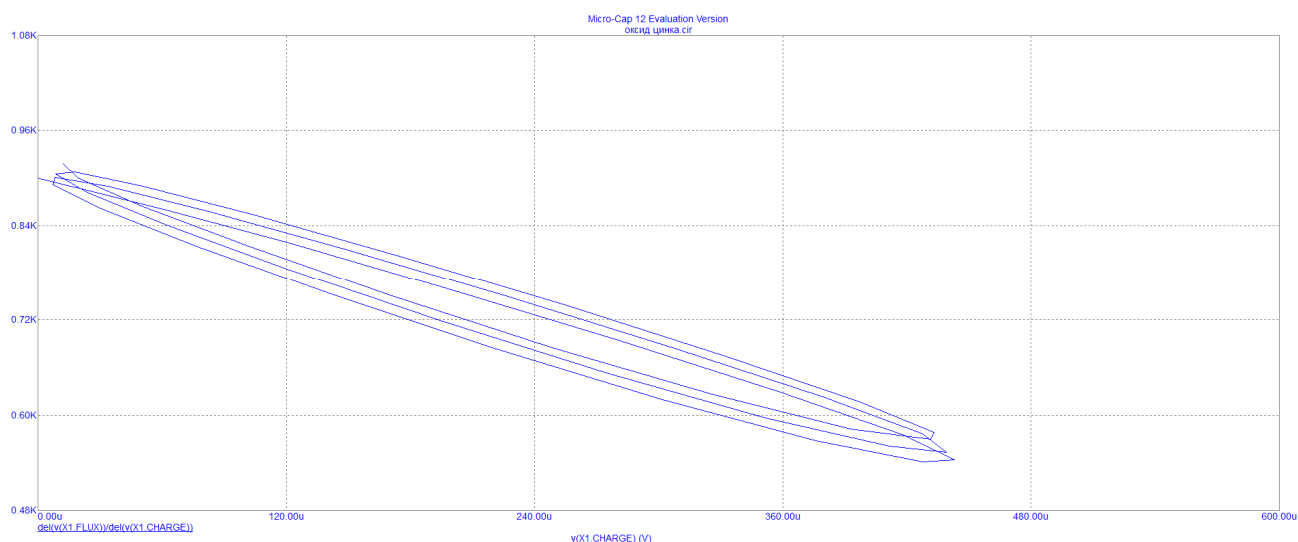
б



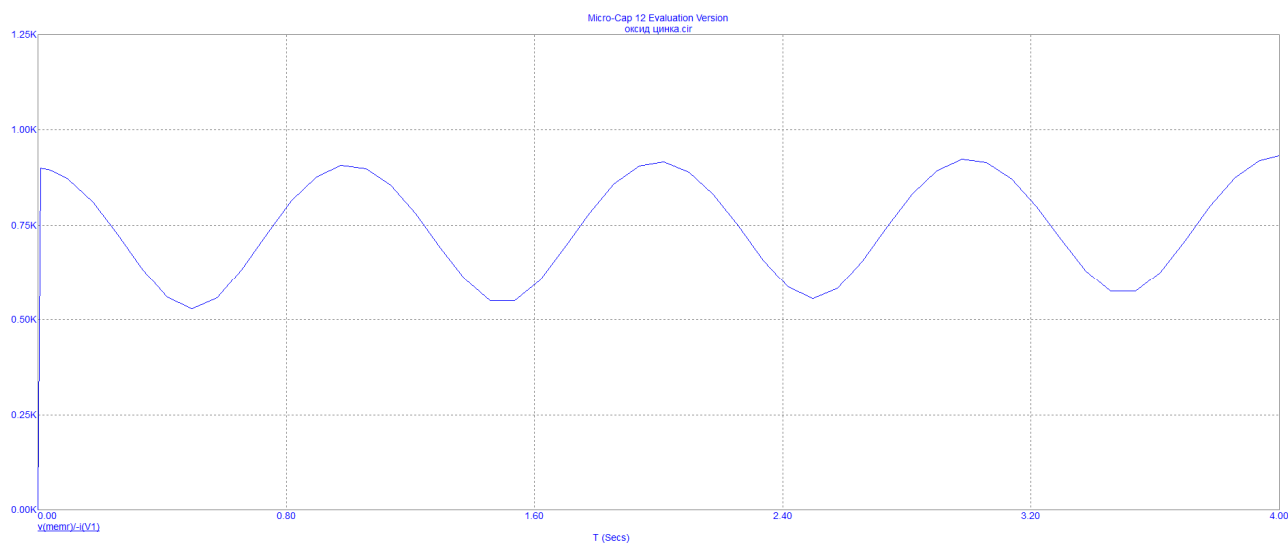
B



Г



Д



Є

а - залежність напруги та струму від часу; б – залежність струму мемристора від напруги; в – залежність зміни x в часі; г – зміна x в залежності від напруги; д – залежність мемристивності від заряду; е – зміна опору у часі.

Рисунок 2.5 - Графіки результатів моделювання мемристора з оксидом цинку.

Результати моделювання:

- Вольт-амперна характеристика:

Мемристор з оксидом цинку має плавний і передбачуваний перехід між високоомним і низькоомним станами при зміні напруги, що робить його зручним в управлінні та програмуванні. ВАХ демонструє лінійну поведінку в певному діапазоні напруги, що полегшує його інтеграцію в існуючі схеми та електронні пристрої.

- Циклічність та стабільність:

Модель показує, що мемристор має високу циклічність і стабільність при багаторазових перемиканнях станів, що робить його надійним для використання в довготривалих додатках, таких як зберігання даних та штучний інтелект.

- Час перемикання:

Дослідження вказують на короткий час перемикання, що робить його ефективним для швидкого запису та читання даних, що особливо важливо для високопродуктивних обчислювальних систем.

- Енергоспоживання:

Результати моделювання свідчать про низьке енергоспоживання мемристора з оксидом цинку, що дозволяє знизити енерговитрати пристроїв та збільшити їхню автономність роботи.

- Стабільність та деградація:

Виявлено високу стабільність та мінімальну деградацію характеристик навіть при тривалій експлуатації, що робить його довговічним та надійним компонентом електронних пристроїв.

- Температурна залежність:

Дослідження показують, що мемристор має мінімальну температурну залежність його характеристик, що робить його стабільним у різних кліматичних умовах та за різних температур експлуатації.

Потенціальні мінуси:

- Обмежений термін служби при високих температурах:

При підвищених температурах оксид цинку може зазнавати деградації, що може скоротити його термін служби та надійність роботи.

- Вплив довкілля:

Може бути чутливим до навколишнього середовища, як-от вологість або хімічні речовини, що може призвести до зміни його характеристик і негативно позначитися на його продуктивності.

- Обмежений діапазон робочих температур:

На відміну від деяких інших матеріалів, мемристор цинку може мати обмежений діапазон робочих температур, що обмежує його застосування в деяких екстремальних умовах експлуатації.

- Нестабільність при високих частотах сигналу:

У деяких випадках мемристор з оксидом цинку може виявляти нестабільність за дуже високих частот сигналу, що може знизити його ефективність у високочастотних додатках.

- Можливість електричного пробою:

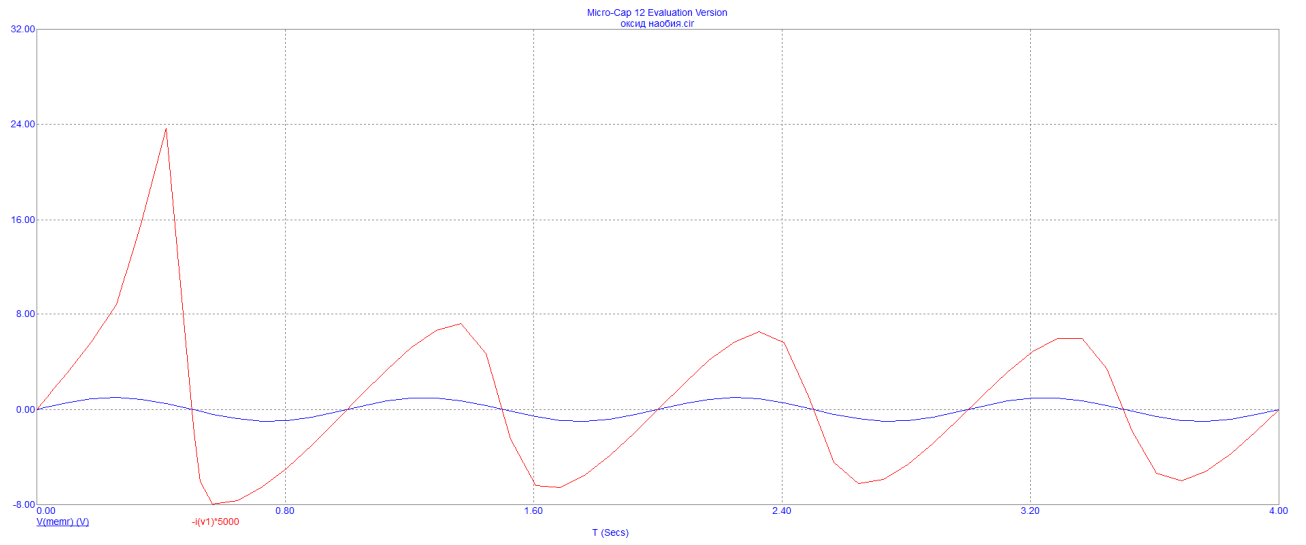
При перевищенні певної напруги може зазнавати електричного пробою, що може призвести до його пошкодження або знищення.

Ці недоліки можуть потенційно обмежувати застосування мемристорів з оксидом цинку в деяких конкретних сценаріях і вимагають додаткової уваги та оптимізації у процесі проектування та розробки пристроїв.

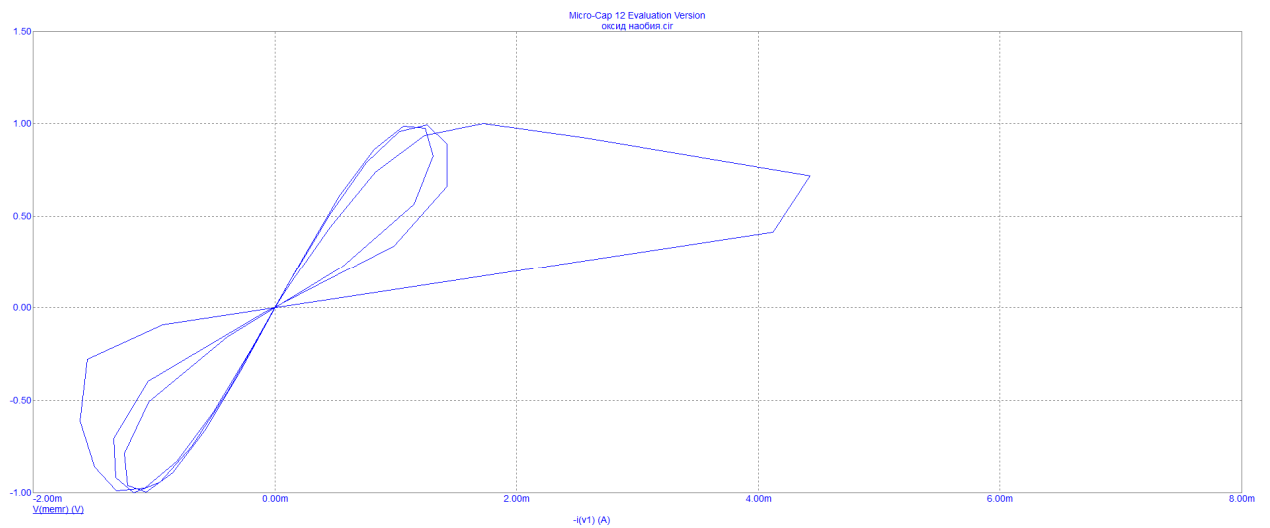
Висновок:

Мемристор з оксидом цинку є перспективним компонентом у сучасній електроніці та технологіях штучного інтелекту, що володіє високою швидкістю роботи, енергоефективністю та стабільністю. Його унікальні властивості, такі як стабільність при високих частотах сигналу, низьке енергоспоживання, висока циклічність та мінімальна деградація роблять його перспективним для широкого спектру додатків. Однак слід враховувати його обмеження, такі як обмежений термін служби при високих температурах та можливість електричного пробою, що потребує додаткової уваги під час його використання та розробки пристроїв.

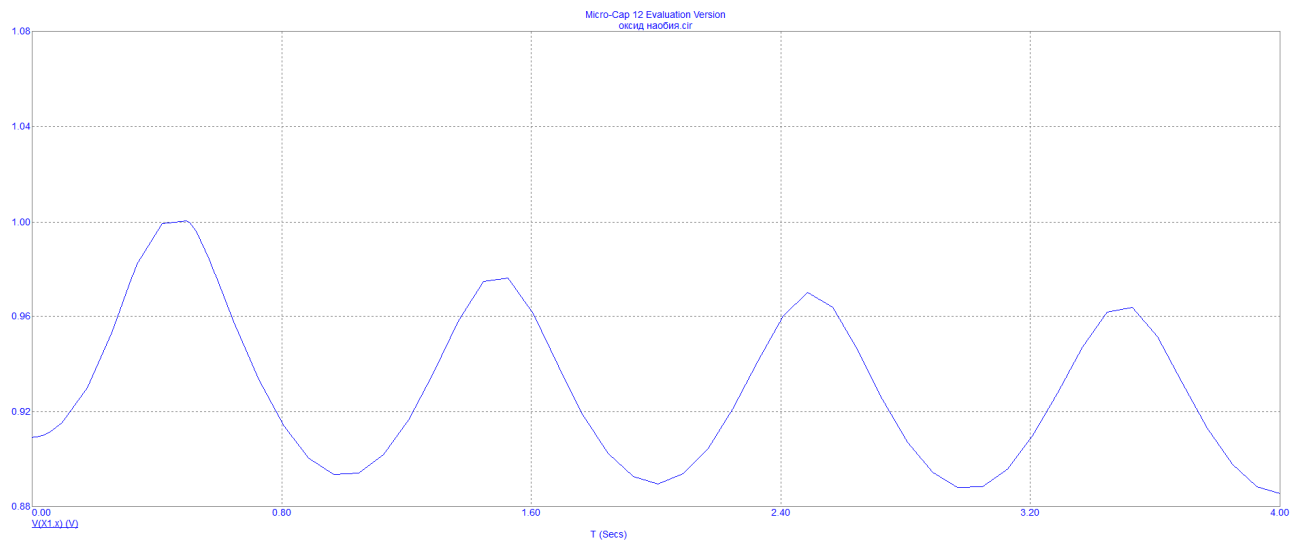
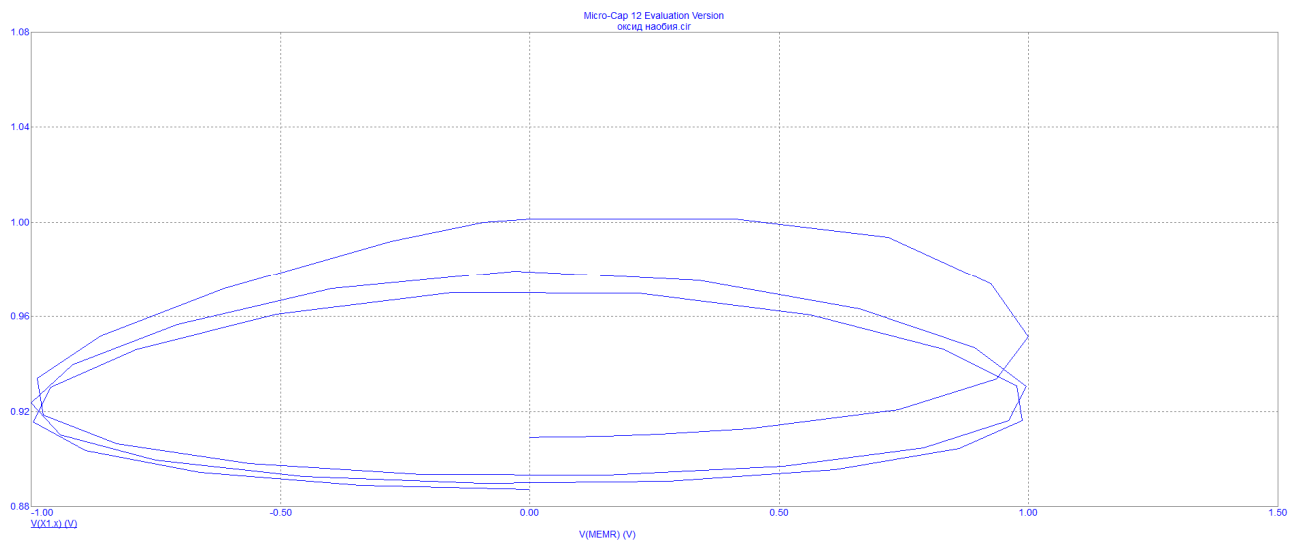
2.6. Симуляція характеристик Nb_2O_5

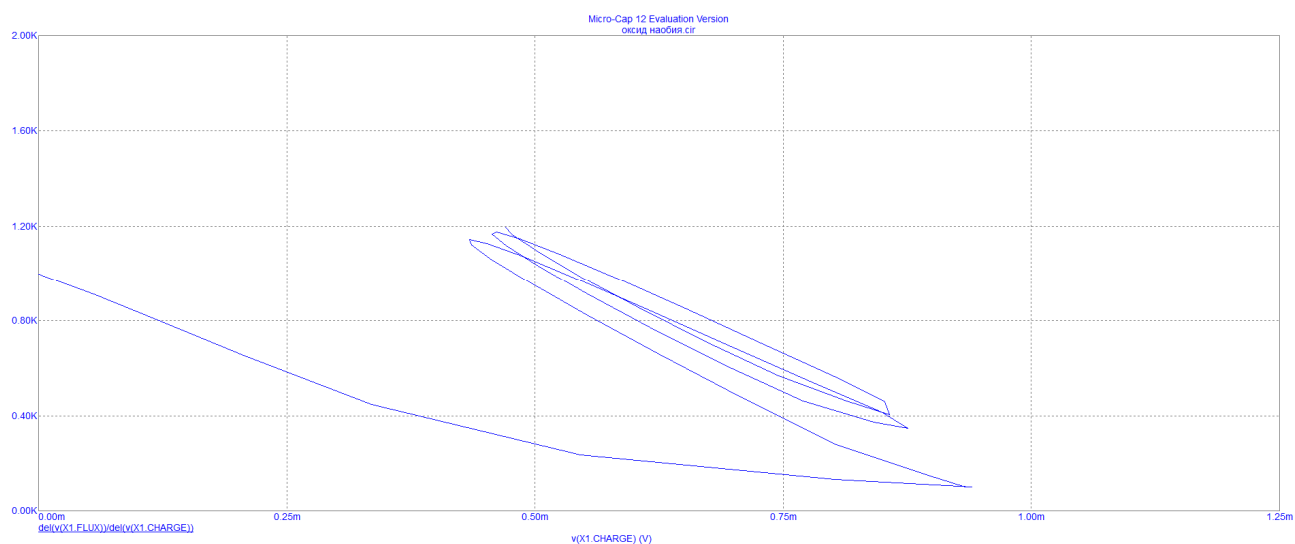


а

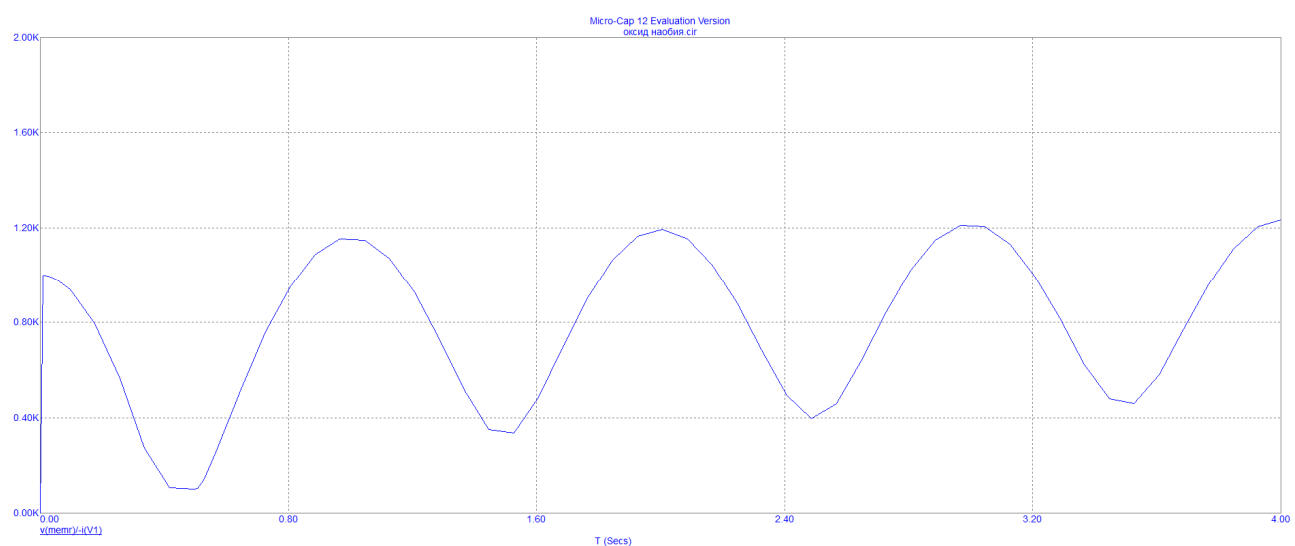


б

**В****Г**



е



є

а - залежність напруги та струму від часу; б – залежність струму мемристора від напруги; в – залежність зміни x в часі; г – зміна x в залежності від напруги; д – залежність мемристивності від заряду; е – зміна опору у часі.

Рисунок 2.9 - Графіки результатів моделювання мемристора з ніобій оксид.

Результати моделювання:

- Висока щільність перемикачів:

Моделювання показує, що мемристор з оксидом ніобію здатний витримувати дуже високу щільність перемикачів, що робить його придатним для використання у пристроях з інтенсивними операціями читання та запису.

- Стійкість до високих електричних полів:

Дослідження демонструють, що мемристор має високу стійкість до впливу високих електричних полів, що зменшує ризик електричного пробою та збільшує надійність пристрою.

- Швидка реакція на сигнал:

Мемристор з оксидом ніобію показує швидкий відгук на зміни вхідного сигналу, що дозволяє використовувати його у додатках, що вимагають високошвидкісної обробки даних та оперативного реагування на зовнішні сигнали.

- Мінімальні втрати енергії при перемиканні:

Результати моделювання вказують на мінімальні втрати енергії під час перемикачів станів, що підвищує загальну енергоефективність мемристора та знижує енергоспоживання пристроїв.

- Висока стабільність опору:

Мемристор з оксидом ніобію демонструє високу стабільність опору в різних станах, що забезпечує надійність та передбачуваність роботи пристрою у довгостроковій перспективі.

- Вольт-амперна характеристика:

Вольт-амперна характеристика показує нелінійну поведінку з чітко вираженими переходами між HRS та LRS станами, що дозволяє точно керувати його станом та використовувати у складних електронних схемах.

Мінуси мемристора з оксидом ніобію:

- Високі вимоги до якості матеріалів:

Для забезпечення стабільної роботи мемристора потрібне використання високоякісних матеріалів, що може збільшувати витрати на виробництво.

- Складність виробництва:

Виготовлення мемристорів з оксидом ніобію може бути технологічно складним процесом, що вимагає точного контролю за параметрами виробництва.

- Температурна чутливість:

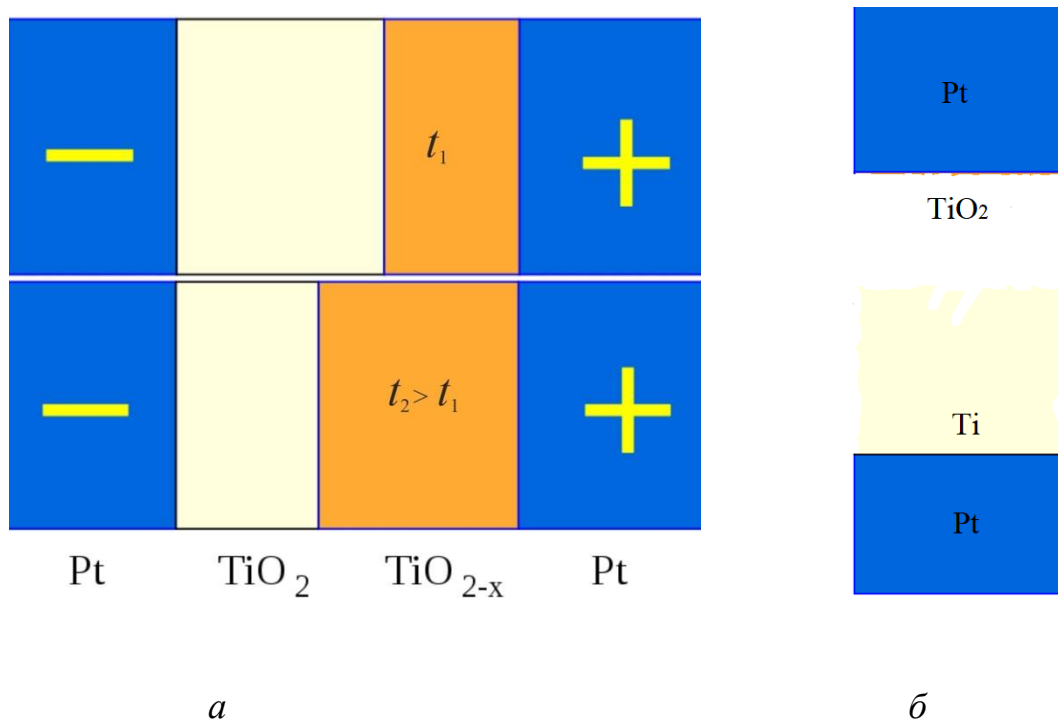
Мемристори з оксидом ніобію можуть бути чутливі до екстремально високих та низьких температур, що обмежує їх використання у певних умовах експлуатації.

Висновок:

Мемристор з оксидом ніобію демонструє високу щільність перемикачів, стійкість до високих електричних полів, швидку реакцію на сигнал та мінімальні втрати енергії при перемиканні, що робить його перспективним компонентом для високопродуктивних та енергоефективних додатків. Однак високі вимоги до якості матеріалів та складність виробництва можуть обмежувати його застосування у деяких сценаріях, що потребують додаткової уваги до процесу виготовлення та контролю якості.

2.6 Вірогідний механізм протікання струму

Ґрунтуючись на гіпотезі про наявність киснево-вакансійних ниток між двома ідентичними масивними металевими електродами (Pt), електрон з лівого електрода переходить ефективно на правий (на якому позитивний потенціал) лише за допомогою складної польової емісії у «порожні» («наповнені» вакуумом) киснево - вакансійні нитки, а потім рухаючись цим каналом переходить у інший електрод. Канал цей, принаймні, неоднорідний: у лівого електрода його переріз менший, ніж поблизу правого електрода, внаслідок того, що концентрація вакансій кисню праворуч більша, ніж ліворуч. Це демонструє (рис. 2.7 а), на якому в різні моменти часу t умовно показано зріст межі області, збагаченої вакансіями.[22]



а – структура під прямою напругою U у часі, *б* – метод отримання сандвіча

Рисунок 2.7 Структура каналу киснево-вакансійної нитки [22]

Куди піде кисень при переміщенні границі, якщо загальна формула складу **TiO₂** залишається незмінною? Це питання у літературі, наскільки нам відомо, не обговорювалося.

Якщо розбити об'єм плівки на комірки за кількістю молекул **TiO₂** (аналог вузлів у кристалічній ґратці), то при переміщенні границі, на перший погляд, має відбуватися часткове виснаження кисню у плівці! Як це може бути?

Швидше за все, кількість кисню в плівці не змінюється, а він просто переходить з комірки (вузла) **TiO₂** в міжвузловий простір. Виникає точковий дефект – міжвузловий кисень O, який дифундує у плівці, не зв'язуючись з Ti. Порожнє місце, що залишилося в комірці - теж точковий дефект - киснева вакансія, нитки яких і утворюють канали провідності польової емісії.

Автоелектронна емісія (польова емісія, тунельна емісія) - це випромінювання електронів провідними твердими і рідкими тілами під дією зовнішнього електричного поля без попереднього збудження цих електронів, тобто без додаткових витрат енергії, що властиво іншим видам електронної емісії.

Тому електрони, потрапляючи на правий електрод, мають надлишкову кінетичну енергію, приблизно рівною eU (e – елементарний позитивний заряд), порівняно з власними електронами електрода. Це призводить до того, що правий електрод розігрівається, розігріваючи у свою чергу і саму окисну плівку. Її нагрівання може стимулювати утворення вакансійних ниток та дифузію кисню. Але навіть такі уявлення ідеальної структури (рис.2.7) при детальному розгляді призводять до того, що вакансійні нитки не є прямими, а, принаймні, ламаними. Внаслідок цього розсіювання електрона та нагрівання відбуватиметься вже в самій окисній плівці.

Таку картину можна ще уточнити, спрощено представляючи спосіб виготовлення сандвіча мемристора (рис. 2.9). Швидше за все на товсту пластину Pt напилюється у вакуумі нанометрова плівка Ti, потім у камеру запускається атомарний кисень, який окислює Ti неоднорідно по глибині, так що правий електрод Pt контактує з чистим Ti, який у міру переміщення границі x до вільної поверхні насичується киснем. Потім у камері створюється знову вакуум, а вже на окислений край плівки Ti напилюється інша товста плівка Pt.[23-25]

Яка довжина вакансійних ниток? Зробимо оцінку.

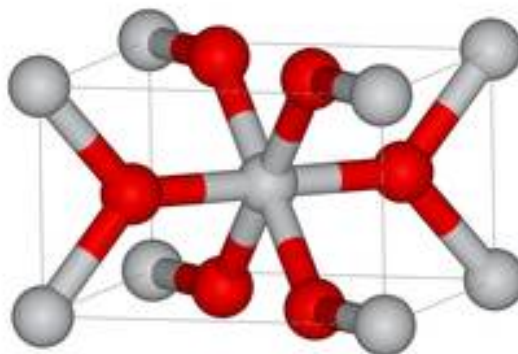


Рисунок 2.8 - Діоксид титану у рутильній формі (сірим кольором позначені атоми титану, червоним – кисню) [26]

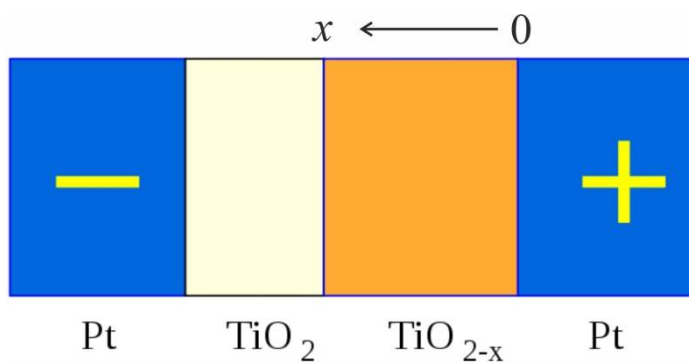


Рисунок 2.9 - Схема відліку x від 0 до 3 нм.

Діаметр лінійної молекули TiO_2 приблизно 6 борівських радіусів (1 нм = 18,3 борівських радіусів), тому на 10 нм між електродами міститься приблизно 30 комірок (молекул) TiO_2 і довжина киснево-вакансійної нитки приблизно дорівнює 30-40 діаметрів атомів кисню.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі досліджено ВАХ мемристорів: оксид титану(TiO_2), оксид гафнію(HfO_2), оксид кремнію(SiO_2), оксид цинку(ZnO) і оксид ніобію(Nb_2O_5).

В результаті порівняльного аналізу графіків мемристорів з різноманітними оксидами продемонстровано суттєві відмінності:

1. Мемристор з оксидом титану (TiO_2)

Плюси:

- Швидкість перемикавання: Висока швидкість перемикавання станів, що робить його ефективним для швидкого читання та запису даних.
- Стабільність та циклічність: Висока стабільність та циклічність при багаторазових перемикаваннях.
- Низьке енергоспоживання: Енергоефективність, особливо у режимі очікування.

Мінуси:

- Чутливість до високих температур: Схильний до деградації при високих температурах, що може обмежувати його довговічність.
- Електричний пробій: Можливість електричного пробію при високих напругах.

Застосування: Підходить для застосування в енергоефективних пристроях та системах зберігання даних, де важлива висока швидкість та циклічність.

2. Мемристор з оксидом гафнію (HfO_2)

Плюси:

- Висока стабільність і надійність: Має високу стабільність і низьку деградацію характеристик.
- Температурна стійкість: Висока стійкість до змін температури.
- Енергоспоживання: Низьке енергоспоживання під час перемикавання.

Мінуси:

- Виробничі складності: Складність та висока вартість виробництва.
- Чутливість до високої вологості: Може деградувати за умов високої вологості.

Застосування: Ідеальний для високонадійних та довговічних програм, таких як серверні системи та хмарні сховища.

3. Мемристор з оксидом кремнію (SiO_2)

Плюси:

- Температурна незалежність: Мінімальна температурна залежність, що забезпечує стабільність роботи.
- Висока швидкість перемикавання: підходить для швидкого читання та запису даних.
- Стійкість до зовнішніх факторів: Висока стійкість до електромагнітних перешкод та механічних впливів.

Мінуси:

- Обмежена циклічність: Можливі обмеження кількості циклів запису/стирання.
- Необхідність стабілізації температури: У деяких випадках потребує додаткової системи стабілізації температури.

Застосування: Підходить для використання у споживчій електроніці та системах, де важлива висока швидкість та стабільність.

4. Мемристор із оксидом цинку (ZnO)

Плюси:

- Стабільність при високій частоті: Має стабільність при роботі з високочастотними сигналами.
- Енергоефективність: Низьке енергоспоживання та висока ефективність.
- Стійкість до дрейфу: Поліпшена стійкість до дрейфу.

Мінуси:

- Обмежений термін служби при високих температурах: Може деградувати при тривалому впливі високих температур.

- Чутливість до довкілля: Вплив факторів довкілля може знижувати його продуктивність.

Застосування: Ідеальний для високошвидкісних та енергоефективних програм, таких як мобільні пристрої та портативна електроніка.

5. Мемристор з оксидом ніобію (NbO_x)

Плюси:

- Щільність перемикань: Висока густина перемикань, що робить його придатним для інтенсивних операцій читання та запису.
- Стійкість до високих електричних полів: Висока стійкість до електричних полів, знижує ризик пробою.
- Мінімальні втрати енергії: Низькі втрати енергії під час перемикання.

Мінуси:

- Високі вимоги до якості матеріалів: Потрібні матеріали високої якості, що підвищує вартість.
- Складність виробництва: Виробничий процес складний і потребує точного контролю.

Застосування: Підходить для високопродуктивних систем, які потребують інтенсивних операцій читання та запису, таких як системи машинного навчання та штучного інтелекту.

Підсумовуючий висновок:

Кожен із оксидів, що використовуються в мемристорах, має унікальні характеристики, які роблять його придатним для конкретних застосувань:

- Оксид титану: Висока швидкість та циклічність, ідеальний для енергоефективних систем зберігання даних.
- Оксид гафнію: Висока стабільність та надійність, підходить для серверних систем та хмарних сховищ.
- Оксид кремнію: Висока швидкість та стійкість, використовується у споживчій електроніці.

- Оксид цинку: Стабільність при високих частотах, ефективна у мобільних пристроях.
- Оксид ніобію: Висока щільність перемикачів та стійкість, застосовується у високопродуктивних системах II.

Вибір оксиду для мемристора залежить від конкретних вимог та умов експлуатації пристрою, що дозволяє оптимізувати його продуктивність, енергоефективність та довговічність.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Артюхов В.Г., Коноваленко І.В. Схемотехнічне моделювання мемристора в середовищі MicroCap/ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 2015, 27-34с.
2. Артюхова О.В., Писаренко Л.Д. Аналіз моделей мемристора для програм схемотехнічного проектування/ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 2016, 6-12с.
3. Белоголовський М.А., Жилтухіна Е.С., Короташ І.В., Краковний А.А., Полоцький Д.Ю., Руденко Е.М. Мемрісторні ефекти в твердотільних структурах/ Київський інститут металофізики імені Г.В. Курдюмова, 2016, 996-1005с.
4. Жилтухіна Е.С., Шамаєв В.В. Частотні характеристики мемристорних структур на основі складних оксидів перехідних металів/ Донецький національний університет імені Василя Стуса, 2017, 734-740с.
5. Оптасюк С.В., Поведа Р.А. Моделювання електричних властивостей мемристора у курсі лабораторних робіт в університеті/ Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2019, 137-138с.
6. Поведа Р.А. Деякі актуальні доповнення до курсу електро- та радіотехніки у вищих навчальних закладах. Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка. Серія педагогічна. – Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2011. Вип. 17: Інноваційні технології управління компетентісно-світоглядним становленням учителя: фізика, технологія, астрономія. С. 250-254.

7. Поведа Р.А., Оптасюк С.В., Криськов Ц.А. Основи сучасної електроніки. Лабораторний практикум. Частина 1. Кам'янець-Подільський: Аксіома, 2018. 70 с.
8. Alekseeva L., Petrov A., Romanov A. [et al.]. Resistive Switching and Memory Effects in BE-Pt/Al₂O₃/TiO₂/Pt-TE and BEPt/TiO₂/Al₂O₃/Pt-TE Systems Fabricated by Atomic Layer Deposition, DIELECTRIC THIN FILMS FOR FUTURE ELECTRON DEVICES (SCIENCE AND TECHNOLOGY) IWDTF-2015, November 2–4, 2015, Miraikan, National Museum of Emerging Science and Innovation, Tokyo, Japan. P. 65–66.
9. Chua L.O. «Memristor – the missing circuit element». IEEE Transaction son circuit theory. Vol. 18. No 5., 1971, p. 507-519.
10. Hu M., Graves C. E., Li C., Li Y., Ge N., Montgomery E., Davila N., Jiang H., Williams R. S., Yang J. J., Xia O., Strachan J. P. Memristor-based analog computation and neural network classification with a dot product engine // Advanced Materials. 2018. V. 30. N 9, P. 1705914. DOI: 10.1002/adma.201705914
11. Lin M. H., Wu M. C., Lin C. H., Tseng T. Y. // IEEE Trans. Electron Device. 2010. N 57. P. 1801.
12. Lu W., Jeong D. S., Kozicki M., Waser R. Electrochemical metallization cells-blending nanoionics into nanoelectronics // MRS Bulletin. 2012. Vol. 37. P. 124.
13. Milo V., Ielmini D., Chicca E. Attractor networks and associative memories with STDP learning in RRAM synapses // IEEE International Electron Devices Meeting. San Francisco (CA, USA): IEEE, 2017. P. 11.2.1—11.2.4. DOI: 10.1109/IEDM.2017.8268369
14. Morozov A. Y., Reviznikov D. L. Adaptive interpolation algorithm based on a kd-tree for numerical integration of systems of ordinary differential equations with interval initial conditions // Differential Equations. 2018. V. 54, N 7. P. 945—956.
15. Prodromakis T., Peh B.P., Papavassiliou C. and Toumazou C. A versatile memristor model with non-linear dopant kinetics. IEEE Trans. Electron Devices, vol. 58, no. 9, pp. 3099– 3105, Sep. 2011.

16. Simpson R. E., Fons P., Kolobov A. V., et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2012. Vol. 100. P. 021.
17. Sparvoli M., Gazziro M. A., Marma J. S., Zucchi G. / “Memristor device fabricated from doped graphene oxide,” in 2019 IEEE 10th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS) (Armenia). doi: 10.3390/nano9040518
18. Strukov D.B. and Williams R.S. Exponential ionic drift: Fast switching and low volatility of thin-film memristors. *Appl. Phys. A, Mater. Sci. Process.*, vol. 94, no. 3, pp. 515–519, Mar. 2009.
19. Symanczyk R., Balakrishnan M., Gopalan C., Happ T., Kozicki M., Kund M., Mikolajick T., Mitkova M., Park M., Pinnow C., Robertson J., Ufert K. / Electrical characterization of solid state ionic memory elements. (Proc. of the 2003 Non-Volatile Memory Technology Symposium. San Diego, California, 2003), pp. 17–1.
20. Waser R. Electrochemical and thermochemical memories // *IEEE International Electron Devices Meeting. Tech. Dig.* 2008. P. 289292.
21. Zaplatilek K., “Memristor modeling in MATLAB and Simulink”. *Proceedings of the European computing conference.* ,2011, p. 62-67.
22. Zidan M. A., Strachan J. P., Lu W. D. // *Nature Electronics* 2018. Vol. 1. P. 22.